

П.Ю.Литинский

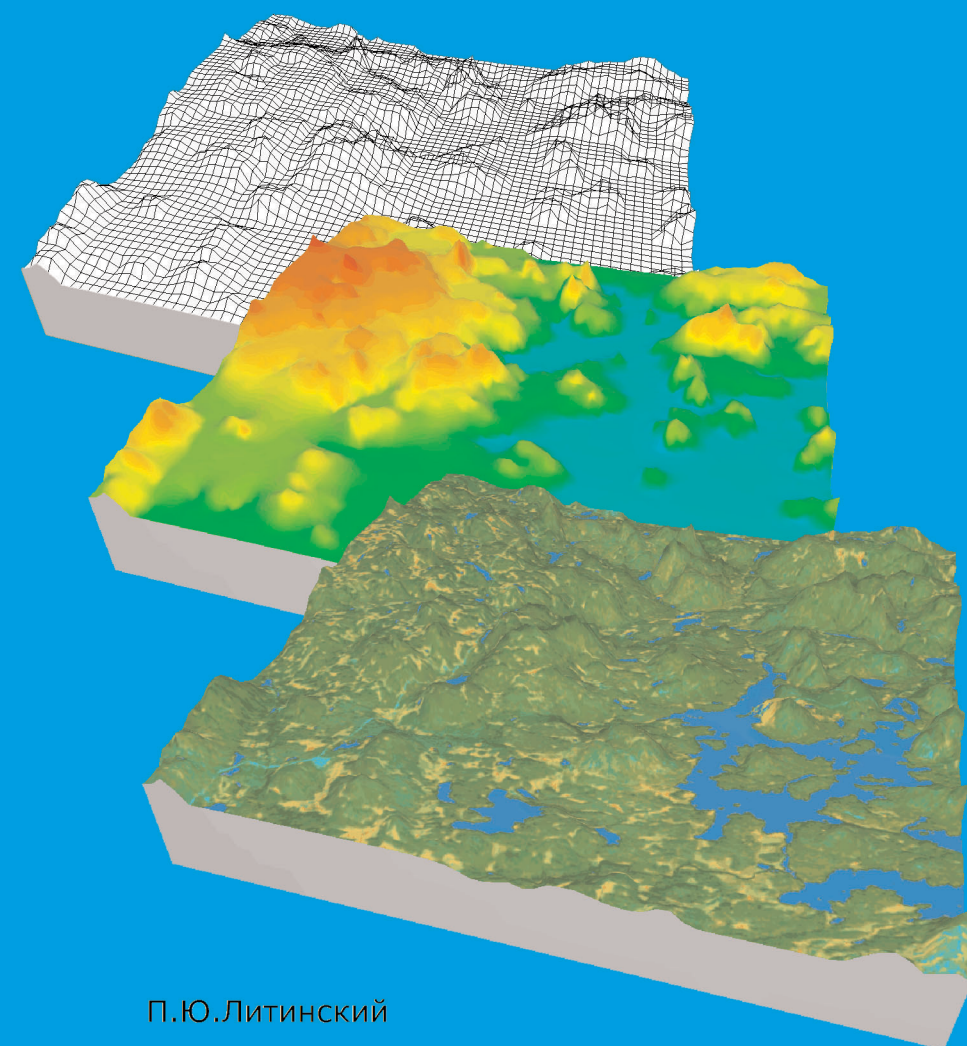
Трёхмерное моделирование структуры и динамики таёжных ландшафтов

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ЛЕСА

П. Ю. Литинский

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ
ТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Петрозаводск 2007



П.Ю.Литинский

Трёхмерное моделирование структуры и динамики таежных ландшафтов

УДК 630*228.81.001.891.57

Литинский П. Ю. **Трехмерное моделирование структуры и динамики таежных ландшафтов.** Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 107 с.: ил. 71, табл. 4. Библиогр. 59 назв.

Изложены концепция и методика создания геоинформационной системы, отражающей структуру наземных экосистем таежной зоны Восточной Фенноскандии, их состояние и динамику естественных и антропогенных сукцессий. Назначение системы – обеспечение дальнейшего развития ландшафтно-экологических исследований и формирования системы рационального природопользования. Исходная информация ГИС – разновременные сканерные снимки высокого разрешения (Landsat TM /ETM+, Spot, IRS), цифровые модели высот (DEM) и данные наземных ключевых участков, заложенных по ландшафтному принципу. Описывается специально разработанный для целей ландшафтного картирования «аналитический» метод управляемой классификации многоспектральных сканерных снимков путем сегментации спектрального пространства.

Работа предназначена для специалистов в области ландшафтной экологии, лесоведения и лесоводства, а также для студентов и аспирантов данных областей естествознания.

Научный редактор д.г.н. Н. Н. Филатов

Рецензенты к.ф.-м.н. А. К. Полин, к.с.-х. н. С. М. Синькевич

ISBN 978-5-9274-0292-2

© П.Ю.Литинский, 2007

© Карельский научный центр РАН, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Геоинформационные системы в ландшафтных исследованиях	8
2. Основные принципы и методы ГИС-технологий	15
Принципы цифровой записи изображения	15
<i>Растровый файл</i>	<i>16</i>
<i>Пространственные модели цвета</i>	<i>17</i>
<i>Цветовые режимы растрового изображения</i>	<i>19</i>
<i>Форматы растровых файлов</i>	<i>22</i>
Геоинформационные системы	26
<i>Растровые и векторные данные в ГИС</i>	<i>27</i>
<i>Картографические проекции</i>	<i>33</i>
<i>Географическая привязка (регистрация) растра</i>	<i>38</i>
<i>Ректификация</i>	<i>39</i>
Цифровые данные дистанционного зондирования	42
<i>Типы систем ДЗ</i>	<i>42</i>
<i>Особенности спектра отражения растительного покрова</i>	<i>45</i>
<i>Форматы файлов сканерных снимков</i>	<i>50</i>
<i>Визуализация сканерного снимка</i>	<i>51</i>
3. Классификация сканерной информации	53
<i>Спектральное пространство</i>	<i>53</i>
<i>Традиционные методы классификации</i>	<i>54</i>
<i>Метод сегментации спектрального пространства</i>	<i>62</i>
<i>Преобразование спектрального пространства</i> <i>для улучшения дифференциации категорий</i>	<i>68</i>
<i>Траектории сигнатур в спектральном пространстве</i> <i>разновременных снимков</i>	<i>69</i>
<i>Анализ текстуры</i>	<i>73</i>

4. Рельеф в ГИС	75
<i>Формирование цифровых моделей высот</i>	<i>75</i>
<i>Геоморфометрический анализ</i>	<i>76</i>
<i>Трехмерная визуализация</i>	<i>78</i>
5. Исследования структуры и динамики ландшафтов	79
Ландшафтное картографирование на основе ГИС-технологий и данных ДЗ	79
Картирование структуры на субландшафтном уровне	82
Мониторинг естественных и антропогенных нарушений растительного покрова	83
<i>Выявление вырубок, ветровалов, гарей</i>	<i>83</i>
<i>Разработка карты антропогенной трансформации ландшафтов</i>	<i>84</i>
<i>Мониторинг состояния лесов в зоне воздействия аэротехногенных выбросов</i>	<i>94</i>
Заключение	99
Приложение. ГИС-пакет GRASS	102
Литература	107

ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных задач современного естествознания – создание общей теории структурно-функциональной организации природных систем, на основе которой могла бы быть разработана система рационального природопользования. Магистральным направлением на пути решения этой задачи к настоящему времени признан синтез географического и экологического подходов, сформировавшийся в междисциплинарное научное направление – ландшафтную экологию (Risser et al., 1984; Forman and Godron, 1986; Urban et al., 1987; Forman, 1995).

Эта наука исследует:

- 1) структуру ландшафта и территориальные связи между экосистемами;
- 2) функции, или взаимодействие, между территориальными элементами, то есть потоки энергии, веществ и видов;
- 3) изменение структуры и функций экосистемной мозаики во времени.

Из данного перечисления задач ландшафтной экологии очевидно, что они направлены прежде всего на изучение пространственно-распределенных объектов и процессов, и поэтому не могут быть решены без использования геоинформационных систем (ГИС). В последние годы использование геоинформационных технологий в данной области получило очень широкое распространение, и процесс этот продолжается в геометрической прогрессии – перечисление ссылок на публикации заняло бы несколько страниц. Однако в большинстве случаев ГИС используются лишь для интеграции результатов ранее проведенных исследований путем перевода различного рода бумажных карт в цифровую форму и формирования баз описательных данных.

Не отрицая важности такого рода деятельности, отметим, что этот подход неэффективен при изучении структуры и динамики экосистем в их реальном состоянии. Для этого необходимо использование комплекса высоких космических, компьютерных, информационных технологий, объединяющего в единое целое геоинформатику и средства дистанционного зондирования (ДЗ) Земли. Исследования в этом направлении также проводятся очень интенсивно, но в большинстве случаев они посвящены решению частных задач – исследовательских, методических, значительно реже хозяйственных – на локальных объектах.

С точки зрения технологии ландшафтно-экологические исследования можно разделить на три основных этапа, или уровня:

Трехмерное моделирование структуры и динамики таежных ландшафтов

- натурные исследования экосистем на пробных площадях, ландшафтных профилях;
- формирование цифровых карт ландшафтной структуры, то есть структурное моделирование. Сюда же можно отнести мониторинг, регистрацию естественных и антропогенных изменений экосистем;
- функциональное моделирование – построение математических моделей межэкосистемного обмена веществ и энергии, интеграционных процессов формирования структур надландшафтного уровня и т.д.

В данной работе рассматриваются вопросы, посвященные второму уровню – концепции и методике структурного моделирования и мониторинга как основы для третьего этапа – функционального моделирования. Обобщается опыт работ, проводимых с начала 1990-х годов по изучению структуры и динамики ландшафтов таежной зоны Восточной Финноскандии с помощью дистанционных методов и ГИС-технологий.

В первой главе рассматриваются существующие подходы к формированию природно-ресурсных геоинформационных систем и использованию при этом данных дистанционного зондирования и формулируется авторская концепция по данному вопросу. С тем чтобы эта работа могла использоваться в качестве учебного пособия по методам цифрового ландшафтного картографирования, во второй главе сжато, но достаточно полно даются базовые сведения о принципах и методах ГИС-технологий – способах цифровой записи изображений, формах представления картографической и описательной информации в ГИС, основных принципах дистанционного зондирования. Затем рассматриваются наиболее распространенные методы компьютерного дешифрирования (классификации) сканерных снимков, показывается их ограниченная пригодность для целей ландшафтного картографирования и предлагается альтернативный метод классификации – управляемая сегментация спектрального пространства. Далее описываются способы получения цифровых моделей рельефа и использование этой информации для моделирования ландшафтов, приводятся краткие сведения об анализе текстуры растровой геоинформации. В заключение даны примеры использования описанных принципов и методов для ландшафтного моделирования и мониторинга состояния таежных экосистем на территории Карелии.

В процессе описания различных операций моделирования структуры ландшафтов указывается, какими модулями ГИС-пакета GRASS данная операция выполняется. Выбор именно этого пакета объясняется двумя

обстоятельствами: во-первых, в нем реализовано большинство разработанных к настоящему времени методов обработки дистанционных данных и географического анализа, а во-вторых, этот пакет свободно распространяется, в том числе и через Интернет, по лицензии GNU (бесплатно, с сохранением авторских прав). Однако использование этого пакета пользователями Windows требует освоения некоторых его особенностей и поэтому в приложении даны краткие инструкции по установке пакета и важнейшим моментам работы с ним.

1. ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛАНДШАФТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

До настоящего времени среди естествоиспытателей, особенно в России, распространено мнение, что ГИС – это некие цифровые карты плюс компьютерная программа, позволяющая эти карты анализировать, корректировать, дополнять, создавать новые слои и т.д. (Ермаков и др., 2006б). В определенном смысле это так и есть. С самого начала развития ГИС цифровые карты получались практически исключительно в результате оцифровки (векторизации) бумажных карт, топографических и иных. И в настоящее время этот способ очень широко распространен. Во многих случаях это оказывается вполне достаточным. Например, для анализа экономических, социальных процессов и явлений. В других случаях такой способ оказывается единственно возможным, например, при оцифровке исторических, геологических и других карт, информация которых непосредственно на поверхности Земли не проявляется.

Однако совсем иначе обстоит дело в тех случаях, когда необходимо иметь данные о компонентах ландшафта (прежде всего биотических) в их реальном состоянии. Для ландшафтно-экологических исследований, и особенно для применения их результатов на практике (ландшафтно-экологического планирования), необходимы геометрически корректные, детальные и актуальные карты растительного (лесного и болотного) покрова. Карт, полностью отвечающих этим требованиям, не существует не только в цифровом, но и в бумажном виде.

Имеются только два готовых источника такой информации – топографические карты и планы лесонасаждений. Однако любой, кто пытался получить данную информацию, знает, что на топокартах, даже крупномасштабных, контуры болот нанесены весьма приблизительно, а информация о лесном покрове, особенно о современном его состоянии, практически отсутствует.

Кроме того, практика показывает, что цифровые карты, полученные путем оцифровки бумажных топографических карт, даже выполненные организациями, имеющими государственные лицензии на их изготовление, часто очень низкого качества. Тематические слои, за исключением, возможно, береговой линии озер, сильно искажены и малоинформативны. Дорожная сеть устарела и содержит много ошибок, в гидрографической (реки) сети также много искажений, а слои лесов и болот – важнейших в таежной зоне категорий земной поверхности – часто вообще не имеют ничего общего с действительностью. Это становится очевидным

при их сопоставлении с данными дистанционного зондирования – космическими сканерными снимками.

Таким образом, если речь идет о собственно ландшафтно-экологических, природно-ресурсных, информационных системах, использование готовых цифровых карт никак нельзя считать приемлемым для создания ГИС, даже в качестве карты-основы.

По сравнению с топокартами планы лесонасаждений содержат, естественно, значительно более детальную информацию о таежных экосистемах, поскольку создаются на основе аэрофотоснимков масштаба 1:15 000 – 1:50 000. Однако имеется несколько обстоятельств, не позволяющих считать и планы лесонасаждений адекватным источником информации для ландшафтно-экологических ГИС.

Планы лесонасаждений создаются прежде всего для обеспечения хозяйственной деятельности, цель которой – получение древесины. Величины, характеризующие запас древостоя, соответствуют (по крайней мере, должны соответствовать) действительности. Однако важнейшие экологические характеристики, прежде всего *тип леса*, часто заведомо искажены. Контурные выделов далеко не всегда отражают естественную структуру лесного покрова, поскольку зависят от разряда лесоустройства. Поэтому план очень мало пригоден для решения задач, выходящих за рамки лесного хозяйства, как научных, так и практических.

В настоящее время планы лесонасаждений создаются по традиционной «бумажной» методике – планы чертятся на бумаге, затем векторизуются. То есть ГИС-технологии как таковые в данном случае отсутствуют, и лишь на конечном этапе используются элементы настольной картографии (*desktop mapping*). На всех стадиях получения плана, в том числе и на стадии оцифровки, возникают неизбежные ошибки и неточности. Кроме того, планы лесонасаждений обычно создаются не в реальной системе географических координат и составить целостное векторное покрытие из отдельных планов невозможно. Средства ГИС позволяют переводить цифровые данные из условной системы координат в реальную географическую, но этот процесс достаточно трудоемок и приводит к добавочным, большим или меньшим, но неизбежным искажениям.

Такие составляющие топокарты, как рельеф и гидрографическая сеть, наносятся с максимальной степенью объективности и обычно неизменны в течение длительного времени. А данные плана лесонасаждений не только изменяемы во времени, но и в значительной степени

субъективны, зависят от квалификации исполнителей и их добросовестности. План – сумма представлений составляющих его таксаторов о лесном покрове. Это ясно видно на прилегающих друг к другу участках, таксация которых выполнена разными исполнителями (аналогичные неувязки относительно лесного и болотного покрова очень часто бросаются в глаза и на смежных листах топокарты одного масштаба).

На плане лесонасаждений крайне мало информации о болотах, составляющих значительную по площади часть таежных экосистем. И наконец, даже в таежной зоне земли лесного фонда занимают не 100 процентов поверхности Земли. Территории населенных пунктов, сельскохозяйственных земель и лесов, не принадлежащих ГЛФ, остаются на планах белыми пятнами. В северотаежной подзоне их доля невелика, но в среднетаежной – местами весьма значительна.

Естественно, топокарты и планы содержат информацию, которую в принципе нельзя получить дистанционными методами. Это названия объектов – озер, рек, населенных пунктов, характеристики элементов инфраструктур (дорог, линий электропередачи и т.д.), что крайне важно для ландшафтно-экологических исследований. Топокарты содержат также информацию о рельефе.

В ландшафтной экологии рельеф рассматривается как свойство литогенной основы – абиотического компонента природно-территориальных комплексов. Эта основа играет ведущую по сравнению с другими компонентами роль в формировании и развитии ландшафтов, что связано с ее более медленным темпом изменений и относительной независимостью развития. С экологической точки зрения рельеф является постоянно действующим фактором, играющим значительную роль в процессах круговорота вещества и энергии. Рельеф определяет направление и интенсивность физических, химических процессов, микроклиматические особенности, водный режим, распределение растительности и почв. Поэтому полнофункциональная ландшафтно-экологическая ГИС должна быть трехмерной по определению.

В последние годы появляется много работ, свидетельствующих о высокой эффективности применения цифровых данных о рельефе (цифровых моделей высот, DEM – digital elevation model) и ГИС-технологий при изучении структуры ландшафтов (Гагаева и др., 2003; Гофаров, 2004; Ермаков и др., 2006а). В большинстве таких работ DEM формировалась путем обработки векторизованных горизонталей топокарт. Этот способ можно признать приемлемым лишь ввиду отсутствия в настоящее время в России значительно более точных данных, которые могут быть получены дистанционными методами.

Таким образом, информация о растительном покрове как топокарт, так и планов лесонасаждений неактуальна, вторична, субъективна, искажена. Более достоверна, но не очень удобна для обработки и информация топокарт о рельефе. Следовательно, оцифровывать нужно не вторичный источник информации – топографические и иные карты, а первичный – непосредственно поверхность Земли. Эту задачу и решают современные средства дистанционного зондирования – сканеры, радары, лидары.

Наиболее распространенный в настоящее время тип дистанционных данных – цифровые снимки космических сканеров. Эти приборы регистрируют отраженное от земной поверхности солнечное излучение в нескольких спектральных диапазонах (видимых и инфракрасных), и снимки, таким образом, несут огромное количество качественной информации о структуре и состоянии растительного покрова, выраженной в количественной, цифровой форме. Другой важнейший тип дистанционных данных – радарные снимки. Их совместное использование со сканерными снимками очень эффективно, дает «синергический эффект» (Кравцова, 2003), поскольку сканеры и радары дают информацию о качественно различных характеристиках земной поверхности. В последние годы начинает получать распространение новый, исключительно эффективный тип дистанционного зондирования – лазерное сканирование, выполняемое лидарами – лазерными дальнометрами (Данилин и др., 2005).

При использовании данных сканирования возможны два принципиально различных подхода: визуальное дешифрирование и автоматизированная компьютерная обработка.

Визуальное дешифрирование проводится экспертами на изображениях, синтезированных из различных каналов сканерных снимков. Действительно, по цвету и текстуре изображения можно с высокой достоверностью выделить различные ландшафтные структуры и участки в различной степени антропогенной трансформации (Малышева, Орлова, 2003).

Однако такому способу получения информации присущи следующие неизбежные недостатки:

- для визуализации обычно используется лишь часть информации сканерного снимка;

- это данные по сути своей в значительной мере субъективны. Визуализация и последующая настройка изображения (по цветовому балансу, яркости, контрастности и т.д.) практически исключают из снимка изначально содержащуюся в нем объективную количественную информацию;

– получение и особенно формализация результатов экспертного дешифрирования, то есть их представление в виде геометрически корректных векторных карт с соответствующей атрибутивной информацией, требуют больших трудозатрат и при этом возникают неизбежные дополнительные искажения («человеческий фактор»);

– что, возможно, наиболее важно – эти результаты однократны, соответствуют определенному периоду времени. Сравнение данных, полученных разными экспертами, на синтезированных различным образом снимках, по крайней мере, малоэффективно.

Визуальное дешифрирование – в определенной степени дань традициям использования аэрокосмических фотоснимков. Для сканерных снимков был даже придуман термин «нефотографические». До сих пор многие исследователи рассматривают сканерные снимки как некий неполноценный аналог аэрокосмических фотоснимков. Неполноценность заключается в низком по сравнению с фотоснимками пространственном разрешении (10–30 м у наиболее распространенных сканеров). Однако сканерные снимки – не аналог фотоснимков, это принципиально другой вид информации. Сканерный снимок – это показания цифрового измерительного прибора, которые нужно соответствующим образом обработать, и тогда полученный результат не только не будет уступать традиционным, но и многократно его превосходить. По большинству параметров: геометрической точности, масштабу охвата, точности выделения различных категорий земной поверхности и трудоемкости обработки, фотографическая информация совершенно несопоставима со сканерной ввиду явного превосходства последней. По детальности (пространственному разрешению) сканерная информация действительно уступает фотографической, но для ландшафтной экологии, элементарные объекты которой имеют линейные размеры в десятки метров и более, это недостатком не является.

Следует подчеркнуть, что сканерные снимки геометрически корректны, то есть приведены к реальной системе географических координат в заданной картографической проекции, и поэтому сами по себе являются высокоточной географической картой масштаба 1:50 000 – 1:5 000 (в зависимости от пространственного разрешения). Никакой другой доступный исследователям источник такой точности не обеспечивает.

В компьютерной обработке информации сканирования также существуют два основных подхода – неуправляемая и управляемая классификации, подробно они будут рассмотрены ниже. Наиболее эффектив-

на управляемая классификация, то есть математическая экстраполяция спектральных характеристик (сигнатур) наземных ключевых участков с известными характеристиками на всю территорию, охваченную сканерным снимком. Очевидно, что получить таким образом достоверную картину растительного покрова для значительной территории можно лишь при наличии на ней достаточно репрезентативной сети ключевых участков, представляющих все основные категории земной поверхности с точки зрения структуры и состояния растительного покрова. Широкому применению управляемой классификации препятствует прежде всего практическое отсутствие для любой более-менее обширной территории достаточно достоверных и репрезентативных натурных данных.

Однако территория Карелии (таежной зоны Восточной Фенноскандии) может служить практически идеальным полигоном для разработки методики создания ландшафтно-экологической географической информационно-системы. Ее территория охватывает северо- и среднетаежную подзоны тайги, характеризуется сложной и в то же время хорошо изученной ландшафтной структурой. Ландшафтные исследования ведутся в Институте леса КарНЦ РАН с середины 1970-х гг. Накоплен огромный объем натурных данных по всей территории Карелии (более 50 ландшафтных профилей общей протяженностью более 250 км), разработана оригинальная региональная классификация типов ландшафтов (Волков и др., 1990, 1995). На основе данных исследований сформировалось новое научное направление в изучении наземных экосистем – ландшафтная экология таежных лесов (Громцев, 2000).

Использование ГИС-технологий и цифровой сканерной информации в Институте леса началось в 1990 г. Основные направления – мониторинг аэротехногенной деградации лесов (Литинский, 1995, 1996), инвентаризация ОПТ и крупных массивов коренных лесов (Громцев, Литинский, 1999). Отметим, что опыт создания геоинформационных систем различного уровня и назначения – окрестностей музея-заповедника Кижи, нескольких административных районов Карелии (в рамках проектов ТА-СИС), модельных объектов ландшафтно-экологического планирования проекта ТАСИС «Управление лесными ресурсами на Северо-Западе России», а также знакомство с другими аналогичными разработками – показал очень малую информативность ГИС, созданных только на основе оцифрованных топокарт и планов лесонасаждений.

Из-за высокой стоимости качественных зарубежных сканерных снимков их применение долгое время, до конца 1990-х гг., ограничи-

валось в основном территориями заповедников и национальных парков, прилегающих к российско-финской границе, полученных в рамках совместных проектов. Тем не менее это позволило накопить опыт обработки сканерной информации. В тот же период возникла очевидная идея – использовать данные ландшафтных профилей в качестве ключевых участков для дешифрирования сканерной информации. Выяснилось также, что результаты классификации сканерных снимков стандартными, чисто математическими методами, реализованными в распространенных пакетах (Idrisi, GRASS, Erdas), во многих случаях неудовлетворительны с точки зрения соответствия реальной структуре растительного покрова. В связи с этим был разработан принципиально иной, «аналитический», метод классификации, основанный на изучении закономерностей формирования многомерного спектрального пространства сканерного снимка.

Благодаря запуску в 1999 г. американского некоммерческого сканера Landsat 7 высококачественные снимки с разрешением 15–30 м имеются для всей Карелии и сопредельных территорий. Прогресс компьютерной техники позволил эффективно использовать для обработки снимков персональные компьютеры среднего уровня. В 2001 г. по гранту РФФИ выполнены работы по созданию электронного атласа ландшафтов Карелии, в процессе которых накопленный ранее опыт создания ландшафтных карт был трансформирован для применения на основе новых технологических возможностей. Все это создало предпосылки для создания масштабной полифункциональной ландшафтно-экологической ГИС физико-географической области – Восточной Фенноскандии. Основные принципы ее формирования следующие:

- теоретическая основа – результаты ландшафтных исследований;
- информационная основа – цифровые данные космического сканирования высокого разрешения (10–30 м) и цифровые модели высот;
- метод обработки данных – управляемая классификация;
- исключение визуальных методов дешифрирования и неавтоматических методов обработки данных ввиду их недостоверности и неэффективности.

Назначение системы – обеспечение дальнейших ландшафтных исследований, переход в перспективе от структурного моделирования к моделированию функциональному и научно обоснованному ландшафтно-экологическому планированию.

2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Принципы цифровой записи изображения

Системы цифровой записи изображения моделируют устройство человеческого глаза, который реагирует на электромагнитное излучение – особый вид энергии, представляющей собой пульсирующие с высокой частотой поля – электрическое и магнитное. Электромагнитное излучение создается как естественными (звезды, планеты), так и искусственными объектами – различными лампами, лазерами, радарными. Человеческий глаз чувствителен лишь к очень небольшому диапазону частот излучения, который и называется видимым светом (рис. 1). Частота измеряется в герцах, то есть количеством пульсаций в секунду. Излучение может также характеризоваться длиной волны, то есть расстоянием, которое излучение проходит за одно колебание, поэтому на рисунке приведены обе шкалы.

Электромагнитное излучение через хрусталик – линзу с изменяемыми оптическими параметрами – поступает на сетчатку, в которой имеется примерно 6.5 миллиона клеток трех типов, участки их наибольшей чувствительности соответствуют трем участкам электромагнитного спектра: красному, зеленому, синему (рис. 2). Три рядом расположенные цветоочувствительные клетки составляют один элемент сетчатки (рис. 3). В сетчатке имеется также более ста миллионов светочувствительных клеток, чувствительных ко всему видимому диапазону, то есть регистрирующих лишь яркость изображения.

Информация об уровне сигнала (яркости) каждой клетки передается в мозг, где из отдельных элементов формируется целостное изображение предметов – их очертания и цвета. Отметим, что изображение, формируемое мозгом, значительно отличается от того, которое получается на сетчатке. Законы восприятия изображения, особенно цвета изображения, очень сложны и до конца не изучены, о чем не следует забывать приверженцам визуального дешифрирования данных дистанционного зондирования.

Цветовой оттенок, воспринимаемый мозгом (а всего их человек различает более трехсот тысяч), зависит от соотношения уровней яркости, регистрируемой каждой из трех цветоочувствительных клеток. Так, если уровни всех трех сигналов одинаковы и максимальны, цвет воспринимается как белый. Если сигнал в красном участке максимален, а в двух других минимален, цвет воспринимается как красный. Максимальный сигнал в красном и зеленом участке спектра при минимуме синего дает желтый цвет и т.д. Таким образом, любой оттенок цвета можно записать тремя числами – уровнями яркости красного (R – red), зеленого (G – green) и синего (B – blue) цветов. Этот принцип и используется во всех технических системах

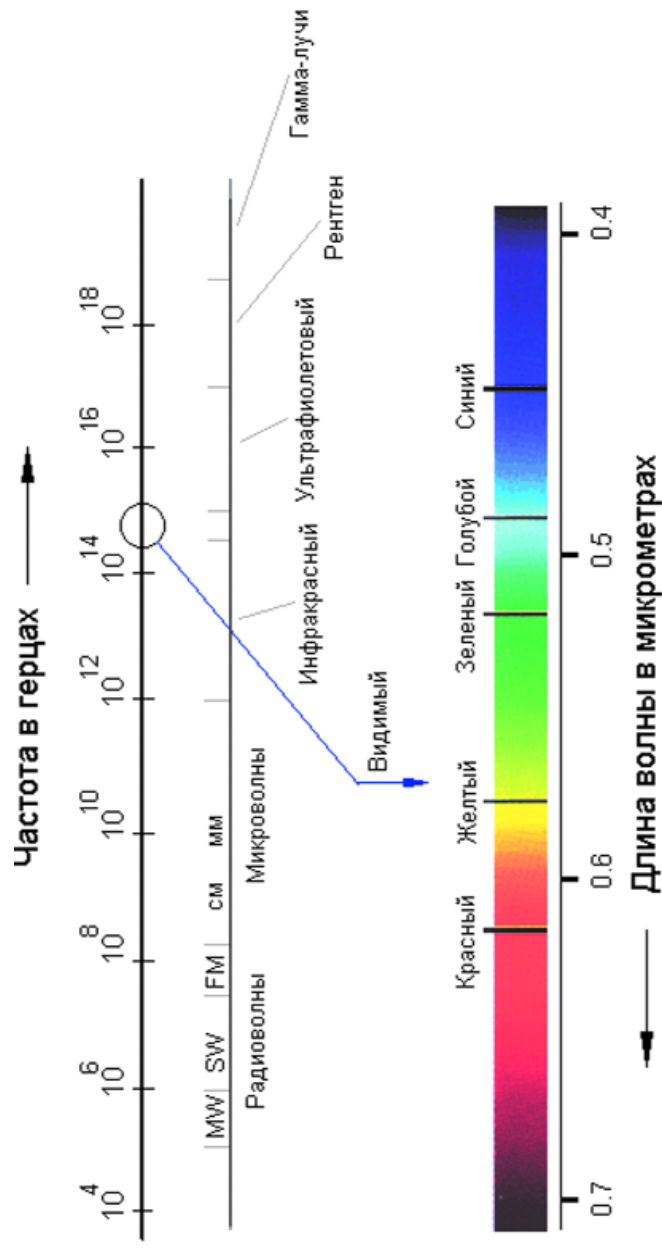


Рис. 1. Шкала электромагнитного излучения и видимый диапазон

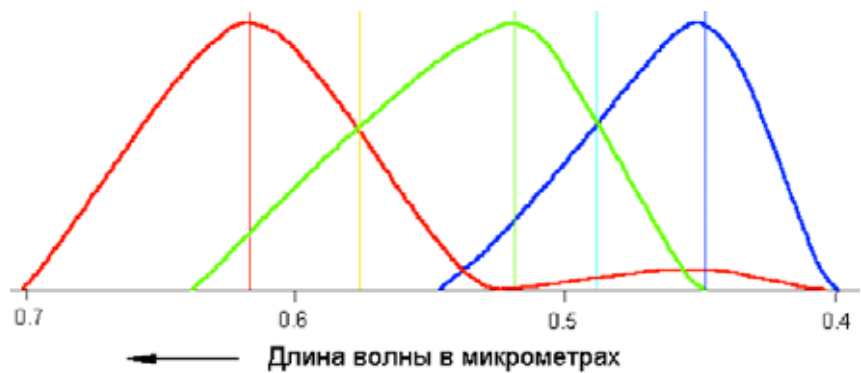


Рис. 2. График чувствительности трех видов цветочувствительных клеток

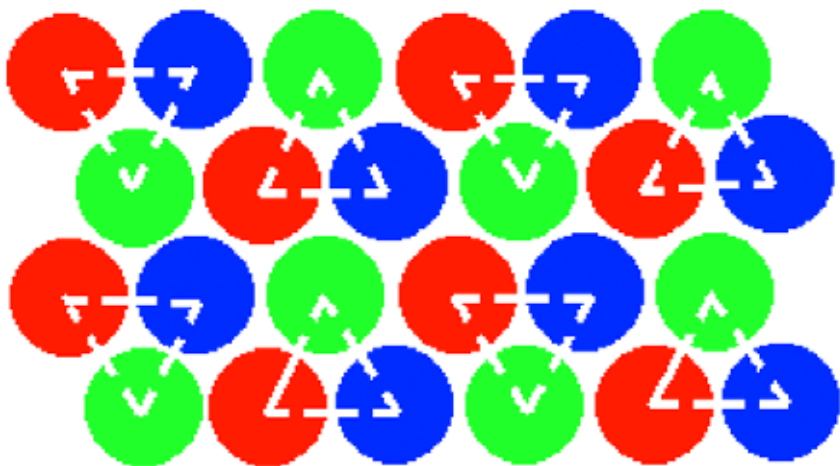


Рис. 3. Схематическое изображение сетчатки

Показано восемь цветочувствительных элементов (триады клеток объединены пунктирными треугольниками). Цветными кружками показаны клетки с чувствительностью в соответствующем диапазоне — красном, зеленом, синем

записи и воспроизведения изображения. Далее буквосочетание RGB будет везде означать красный, зеленый и синий цвета.

Изображение в этих системах так же, как и в сетчатке глаза, разбивается на отдельные элементы – пикселы (от английского *picture element* – элемент картинки). В устройствах записи (сканерах, фото- и видеокамерах) используются датчики трех основных цветов, а в устройствах воспроизведения (дисплеях, мониторах) – излучатели этих же цветов. Триада излучателей составляет один пиксел. Устройство дисплеев копирует устройство сетчатки глаза, только цветочувствительные клетки заменены излучателями.

Экран обычно представляет собой прямоугольник, состоящий из некоторого количества строк (горизонтальных полосок), каждая из которых состоит из одного и того же количества пикселов. Можно считать, что на рис. 3 показан фрагмент экрана – две строки по четыре пиксела в каждой. Полученное таким образом изображение называется растровым или просто растром.

Если необходимо определение позиции отдельного пиксела в растре, это делается в двухмерной системе координат X/Y. Координата X увеличивается слева направо, а координата Y, в отличие от традиционных координат на графиках, – сверху вниз, таким же образом, как позиция символа в строке в текстовых редакторах. Аналогично и координата Y в растре обычно называется «строка», или «ряд» (*row*), а X (порядковый номер пиксела в строке) – «колонка» (*column*, *col*).

Что касается систем записи изображения, то технически они могут быть различными – или устроены аналогично экранам в виде прямоугольной матрицы (как в цифровых фото- и видеокамерах), или состоять из одной движущейся поступательно над изображением линейки (строки) датчиков, как в настольном сканере, или всего из одного трехэлементного RGB-датчика, изображение на который подается системой подвижных зеркал.

В любом случае изображение для дальнейшей обработки или воспроизведения на экране должно быть записано в виде последовательности уровней сигнала (яркости) всех трех цветов для каждого пиксела каждой строки изображения, то есть в виде растрового файла.

Растровый файл

Для передачи уровня яркости в технических системах применяют относительную величину, то есть яркость может изменяться от нулевой до некоторой максимальной. Чем это максимальное число больше (то есть, чем больше градаций яркости), тем более точно передаются цветовые оттенки – больше глу-

бина цвета. В большинстве случаев максимальная яркость выбрана равной 255, так как при этом уровень яркости можно записать одним байтом.

Байт – элементарная единица файла. Байт может рассматриваться и как число в бинарных файлах, и как символ (печатный знак) в текстовых файлах. Байт как число состоит из 8 бит. Бит (элементарная единица информации, основание двоичной системы счисления) может принимать только два значения – 0 или 1. Различных комбинаций из восьми единиц и нулей может быть 256 (два в восьмой степени), поэтому одним байтом можно записать любое число в интервале от нуля до 255, а максимальное число оттенков, которое можно записать тремя байтами, составляет $256 \times 256 \times 256 = 16\,777\,216$, что вполне достаточно для высокого качества цветопередачи.

В растровом файле (обычно в его начале) указывается необходимая для визуализации растра информация – как минимум, это размерность растра: число рядов и колонок, а также порядок цветов в триаде (RGB или BGR), затем записывается собственно растр – триады RGB последовательно для каждого пиксела каждой строки.

Этот простейший способ записи цветного изображения в виде растрового файла с использованием так называемой RGB-модели цвета применяется в нескольких различных форматах растровых файлов и называется 24-битовым (сумма битов в трех байтах), или «Естественные цвета» (True color). Существуют и другие цветовые модели, а также способы записи изображения.

Пространственные модели цвета

RGB-модель

Описанный выше способ записи оттенка цвета в виде уровней яркости красного, зеленого и синего цветов называется RGB-моделью цвета. Эту модель можно схематически представить в виде куба в трехмерной прямоугольной системе координат, оси которой соответствуют трем основным цветам (рис. 4).

Начало оси координат соответствует нулевой яркости по всем осям, то есть черному цвету, максимальные яркости по осям (условно обозначенные единицей) – белому. Любой оттенок цвета можно представить как координату в трехмерном цветовом пространстве. RGB-модель наиболее широко применяется для записи цветных изображений в различных форматах растровых файлов, поскольку она вполне пригодна для записи фиксированного изображения. Однако иногда (например, при обработке данных дистанционного зондирования и анализе других пространственных данных) возникают задачи, которые нельзя выполнить с использованием только этой модели. В этих случаях применяется HSV-модель.

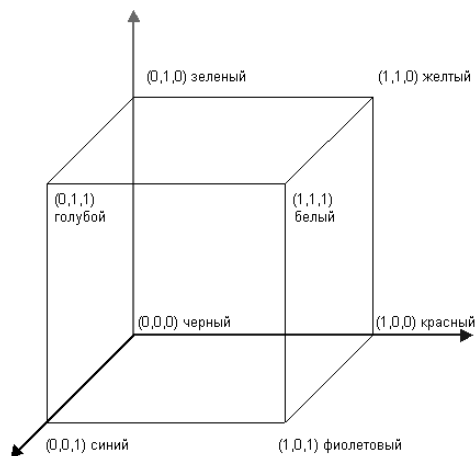


Рис. 4. Схематическое изображение трехмерного цветового пространства RGB-модели цвета

HSV-модель цвета

Название происходит от английских слов Hue (оттенок), Saturation (насыщенность) и Value (величина, в данном случае яркость). Именно численными значениями этих трех величин в данной модели описывается любой цвет. Модель можно представить, например, в виде перевернутого конуса (рис. 5).

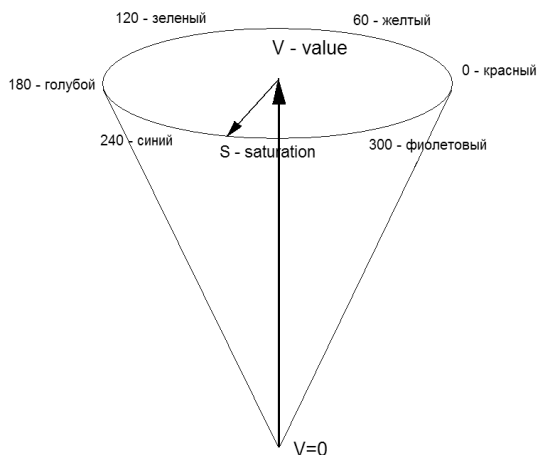


Рис. 5. Схематическое изображение HSV-модели цвета

Все оттенки видимого спектра располагаются по окружности, то есть каждый цвет задается углом ($0-360^\circ$) от нулевого цвета. С физической точки зрения оттенок (H) определяется преобладающей длиной волны электромагнитного излучения, создающего на сетчатке глаза эффект данного цвета. Нулевым, в принципе, может быть задан любой цвет, наиболее часто в качестве такового применяется красный цвет.

Насыщенность (S) характеризует степень разбавления оттенка белым цветом и задается расстоянием от осевой линии конуса, может выражаться в процентах (0–100).

Яркость (V) характеризует общую, безотносительно длины волны, энергию электромагнитного излучения и изменяется от нулевой внизу (на вершине конуса) до максимальной наверху (в плоскости его основания), также может быть выражена в процентах.

Практически же (при записи в виде файлов) все величины (H, S и V), как и в RGB-модели, обычно записываются одним байтом, то есть в интервале 0–255.

Между значениями RGB и HSV существует математическое соответствие, то есть любые цифровые данные могут быть преобразованы из одной модели в другую и обратно, однако это соответствие не вполне взаимно однозначное, то есть при обратном преобразовании изображение будет незначительно отличаться от исходного.

В различных программных пакетах реализованы несколько вариантов данной модели, отличающиеся способом пересчета значений RGB в HSV. Они обозначаются разными аббревиатурами, в которых всегда присутствуют буквы H и S (оттенок и насыщение), а третья может соответствовать одному из английских синонимов понятия value применительно к свету – это и L (lightness), и B (brightness), и I (intensity). Соответственно модели называются и HSB (например, пакет PhotoShop), и HLS (Idrisi), и IHS (Erdas), HIS (GRASS).

Цветовые режимы растрового изображения

В данном разделе пойдет речь об изображениях, для записи которых в качестве основы используется RGB-модель цвета. При использовании вышеописанного режима «Естественные цвета» (True color, 24 bit) размер файла в байтах равен утроенному размеру раstra, то есть количеству составляющих его пикселей, которое в свою очередь равно числу строк (H – высота раstra), умноженному на длину строки (W – ширина раstra), $N=W*H*3$.

В этом режиме можно практически без искажений сохранить любое изображение – от простого черно-белого графика, диаграммы и т.д. до высококачественной цветной фотографии. Однако, если изображение имеет всего несколько цветов или же изображение черно-белое, этот способ называется «неэкономичным» с точки зрения необходимого для его записи размера файла. В настоящее время, когда объем жестких дисков компьютеров измеряется сотнями гигабайт, это не имеет особого значения при хранении не слишком большого количества изображений, но, например, при их передаче по Интернету оказывается уже достаточно существенным.

Например, в растре рис. 3 используется лишь четыре цвета: красный, синий, зеленый и белый. Очевидно, что не имеет смысла многократно записывать в растровый файл одни и те же RGB-триады, соответствующие этим четырем цветам.

Индексированное изображение

Индексация заключается в том, что в файл для каждого пиксела записываются не три числа RGB, а только одно – индекс (номер) цвета, а уровни RGB для каждого цвета (цветовая палитра, или цветовая таблица, color table) сохраняются в особом месте файла (или иногда в отдельном файле, как в пакетах обработки данных дистанционного зондирования).

Палитра может формироваться несколькими способами. В любом случае сначала прочитывается весь растр и определяется число различных триад. Если оно меньше или равно 256, в палитру просто последовательно записываются все триады, и индексированное изображение не будет ничем отличаться от исходного. Такой способ применяется для растров так называемой деловой графики, например, чертежей, графиков, диаграмм. Если же число триад в растре больше 256, полученное изображение будет в той или иной степени, в зависимости от способа индексации, отличаться от исходного.

Разработано несколько вариантов формирования палитры. В простейшем случае все кубическое цветовое пространство разбивается на конечное число участков-кубиков (на практике, точнее, параллелепипедов) с определенными номерами (индексами), и каждому пикселу присваивается номер параллелепипеда, в котором он оказался. Например, используется схема, в которой по зеленой и синей осям пространство разбивается на шесть интервалов, а по красной – на семь. Палитра в этом случае состоит из 252 цветов ($6 * 6 * 7$). Цвета как бы раскладываются по нумерованным ящичкам-параллелепипедам (рис. 6).

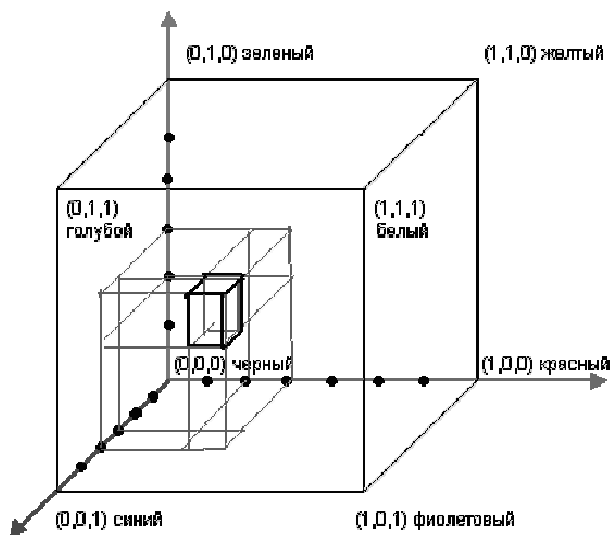


Рис. 6. Параллелепипед цветового пространства, соответствующий третьему интервалу по красной и зеленой осям и четвертому – по синей

Этот алгоритм наиболее быстрый (fast), так как индексирование осуществляется за один просмотр файла. Но ввиду того что число градаций уровней яркости по всем диапазонам уменьшается в несколько раз, при этом происходит значительное огрубление, которое обычно хорошо заметно на глаз, в индексированном изображении невозможно передать плавные переходы цвета. Несколько лучшие результаты дает алгоритм, при котором сначала просматривается весь файл и определяются области наибольшего «сгущения» цветов в трехмерном пространстве. Выбираются 256 (или меньшее, если необходимо, количество) наиболее плотных областей, и координаты их центров выбираются в качестве цветов палитры файла. Палитра в этом случае называется адаптированной, то есть наиболее точно подобранной к данному конкретному изображению.

Черно-белый

Информацию, содержащуюся в цветном RGB изображении, можно записать и другим способом – в виде трех растров одинакового размера, в

каждом из которых содержатся уровни яркости одного из трех цветов изображения. Цвета в данном случае называются каналами. Каждый растр будет представлять собой черно-белое (Ч-Б) изображение, точнее, изображение в градациях серого цвета (grey scale, 8 bit). С технической точки зрения растр в режиме grey scale аналогичен цветному индексированному растру, за исключением того, что в этом случае нет необходимости в палитре – просто значение байта (от нуля до 255) соответствует уровню яркости. С качественной же точки зрения эти режимы отличаются принципиально: индексированный растр содержит дискретную информацию, черно-белый – континуальную. Поэтому и некоторые операции, применимые к черно-белому растру, неприменимы к индексированному и наоборот.

Информация систем дистанционного зондирования, которые имеют каналы не только в видимых (RGB), но и в невидимых человеческому глазу диапазонах электромагнитных волн, обычно записывается в виде нескольких, по числу каналов, растрах режима Ч-Б (grey scale, 8 bit).

Изображение, в котором лишь два цвета – черный и белый – называется монохромным, или однобитным (1 bit, bitmap), поскольку цвет каждого пиксела описывается одним битом. По своей сути это индексированное (дискретное) изображение.

Форматы растровых файлов

Для записи растровых изображений разными фирмами разработаны десятки различных форматов файлов. Самый простой способ – так называемый сырой (RAW) формат: последовательная запись триад байтов RGB для каждого пиксела каждой строки или отдельных байтов для индексированного и черно-белого режимов. Хотя такой способ иногда и используется на практике, очевидно, что изображение может быть правильно выведено на экран, если известны, как минимум, порядок цветов в триаде и длина строки раstra. Поэтому для использования в графических редакторах обычно используются форматы файлов, в которые помимо собственно раstra включена и вся остальная необходимая информация (так называемый заголовок раstra). Системы обработки данных дистанционного зондирования, наоборот, используют форматы, в которых собственно растр записан в одном файле, а его заголовок – в другом, обычно текстовом файле.

Наиболее распространены в настоящее время форматы BMP (*.bmp), GIF (*.gif), JPG (*.jpg), TIFF (*.tif). Эти форматы поддерживаются боль-

шинством программных средств самого различного назначения. В различных форматах могут быть записаны различные режимы изображения.

BMP и TIFF – универсальные форматы, в них могут сохраняться растры всех режимов – от черно-белого монохромного до индексированного цветного и RGB. В файлах формата TIF, кроме того, может содержаться также и разного рода дополнительная информация, например, географическая привязка для данных дистанционного зондирования (аэро- и космических снимков). В этом случае формат называется GeoTIFF.

TIFF – наиболее удобный универсальный формат для хранения самой различной информации, единственный его недостаток – ограничение на общий размер файла, он не может быть больше 4 Gb. Для данных дистанционного зондирования это уже имеет существенное значение, например, снимки космических сканеров сверхвысокого разрешения, записанные без специальных методов сжатия, имеют гораздо большие размеры. Кроме того, в этом формате может записываться не только цветовая, но и количественная информация, например, растры цифровых моделей высот, где значение пиксела соответствует высоте точки над уровнем моря.

В формате GIF могут сохраняться только индексированные растры. Этот формат широко используется при создании веб-страниц еще и потому, что изображение в файлах этого формата может быть мультипликационным.

В формате JPG, наоборот, сохраняются только неиндексированные растры (RGB или grey scale). Этот формат имеет важную особенность: при записи растра в нем происходит искажение исходного изображения. Для уменьшения размера файла определенным способом изменяется цвет не каждого отдельного пиксела, а целой группы рядом расположенных пикселов.

Форматы GIF и JPG – в настоящее время основные форматы, используемые при создании веб-страниц. Для этих целей разработан также универсальный формат PNG, но он еще не получил широкого распространения.

Сжатие растровых файлов

Для уменьшения размера растровых файлов, кроме индексации (уменьшения количества цветов), существуют и другие способы сжатия, или компрессии. Следует различать два варианта этих способов – сжатие файла без искажения содержащегося в нем изображения и с компрессией собственно изображения, что приводит к большему или меньшему его искажению.

В индексированных файлах, содержащих деловую графику, в каждой строке часто повторяются последовательности одинаковых по цвету пикселей (линии, одинаково закрашенные области и т.д.). В этом случае последовательность из нескольких одинаковых по цвету пикселей в строке может быть записана всего двумя байтами – номером цвета пикселя и количеством пикселей. При раскодировании изображение восстанавливается без каких-либо искажений. Этот метод называется RLE (Run Length Encoding). Особенно он эффективен, естественно, для четких простых немногочетных растров «деловой графики», но не для фотографических изображений, в этом случае сжатое изображение может иметь больший размер файла, чем несжатое. Для фотографий предпочтительнее широко известный алгоритм LZW, используемый также и в архиваторах общего назначения. Однако его эффективность невысока, в редких случаях превышает 50–60%. Искажения изображения при использовании этого алгоритма, например, в форматах GIF, TIF, не происходит.

Для фотографий значительно более эффективен способ сжатия, применяемый в формате JPG. Здесь по определенному алгоритму происходит компрессия собственно изображения, то есть небольшое изменение цвета смежных областей раstra. Степень сжатия может меняться в широких пределах, и чем она выше, тем больше искажение исходного изображения и тем меньше размер файла. В некоторых случаях, например, для сканированных многоцветных фотоснимков, потеря качества при средней степени сжатия (в 2–4 раза) очень мало заметна на глаз. По этой причине формат JPG широко используется для фотографий, размещаемых на веб-страницы. При использовании этого формата для деловой графики искажения будут хорошо заметны в виде грязноватых разводов. Поэтому нельзя использовать формат JPG для хранения изображений, которые будут подвергаться в дальнейшем компьютерной обработке.

В конце XX века разработаны очень эффективные алгоритмы сжатия растровых изображений на основе вейвлет-анализа, размер файла уменьшается в десятки раз без визуального заметного ухудшения качества изображения. Реализованы эти алгоритмы в форматах MrSid (Multiresolution Seamless Image Database, *.sid), разработан фирмой LizardTech, а также ECW (ERMapper Compressed Wavelets, *.ecw), фирма ERMapper. В основном эти форматы используются для визуализированных данных ДЗ, например, в глобальном покрытии сканерных снимков GeoCover (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/mrsid.pl>).

Векторный способ записи изображений

Кроме растрового существует еще один очень широко распространенный способ цифровой записи изображений – векторный. Геометрические фигуры, формирующие изображение, в данном случае представляются в виде трех основных классов объектов – точек, линий, полигонов:

1. *Точка* характеризуется парой координат – X и Y.
2. *Линия* представлена как последовательность отрезков (векторов), то есть последовательностью пар координат.
3. Замкнутые линии образуют *полигоны*.

Точечными объектами могут быть, например, различные символы (буквенные, пиктограммы), представляющие собой растровые изображения.

В принципе любые объекты могут быть представлены как в растровой, так и в векторной формах (рис. 7).

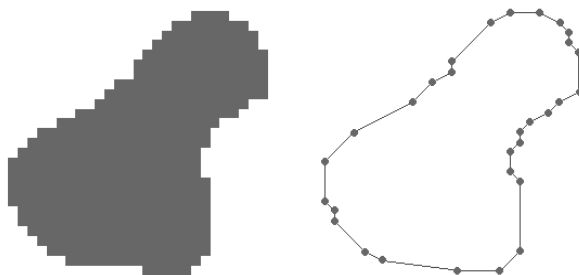


Рис. 7. Схематическое изображение одного и того же объекта в растровой (слева) и векторной (справа) формах

Точками показаны узлы полигона, последовательность координат которых и составляет векторный файл, описывающий форму данного объекта

В файле векторного изображения последовательно записывается для каждого объекта следующая информация:

- Тип объекта (точка, линия, полигон).
- Координаты узлов объекта.
- Графические атрибуты – цвет объекта (в виде соотношения RGB, например), толщина и тип (сплошная, пунктир, штрих) линий; для полигонов – тип заливки и т.д.

Пример файла векторного изображения – метафайл Windows – WMF.

Применять векторный способ более целесообразно для изображения четких геометрических фигур, поскольку при его использовании достаточно сложно передать плавные переходы цвета и нечеткие границы. Поэтому этот способ в основном применяется в технических системах – пакетах для компьютерного проектирования (CAD, computer aided design), для изображения карт в географических информационных системах. В каждой системе используются свои форматы векторных файлов. Универсальный формат для обмена (импорта/экспорта) векторных данных – DXF.

Любое изображение, находящееся в растровой форме, может быть без искажений записано в векторной форме, а обратное преобразование ведет к неминуемым искажениям – абстрактная (нулевой толщины) прямая линия в растровой форме всегда будет изображаться толщиной по крайней мере в один пиксел.

Геоинформационные системы

Основное свойство ГИС – интеграция картографических и описательных (атрибутивных) данных. Как и для любых изображений, в ГИС возможны лишь два способа представления картографических объектов: растровый и векторный. Оба этих способа тесно взаимосвязаны. На разных этапах обработки и анализа данных происходит преобразование данных из векторной формы в растровую и обратно.

Однако характер информации как исходной, так и получаемой в результате обработки и сами методы обработки принципиально различаются. Различаются также и способы хранения атрибутивных данных. Во всех ГИС-пакетах в той или иной степени используется и та, и другая форма представления. Однако одна группа ГИС ориентирована прежде всего на обработку данных в растровой форме, другая группа – в векторной. Соответственно и пакеты называются растровыми и векторными ГИС.

Информация о естественных природных объектах (растительности, почвах и т. д.) по сути своей растровая (мозаичная), поэтому и ГИС-пакеты, предназначенные для создания и анализа геоданных, растровые. Наиболее распространенные из них – Idrisi, ERDAS, GRASS. Системы, предназначенные в основном для анализа готовых данных, – векторные, их называют еще системами *настольной картографии*. Термин, возможно, не очень удачен, это перевод английского *desktop mapping*. Имеется в виду, что картографические работы осуществляются на экране компьютера. Вообще следует отметить, что ввиду не столь давнего возникновения и быстрого развития геоинформационных технологий их терминология

окончательно не сформировалась и разными специалистами используются одни и те же термины в различных случаях, и наоборот, одинаковые операции называются по-разному.

Самые распространенные пакеты настольной картографии – ArcView и MapInfo, они очень удобны для работы с готовыми векторными данными, однако создаются эти данные с помощью растровых ГИС. Нужно сказать, что деление ГИС на растровые и векторные достаточно условно и постепенно исчезает. Все мощные системы включают средства для использования обоих типов представления и анализа данных.

Растровые и векторные данные в ГИС

В растровой форме содержатся сканированные фрагменты бумажных топографических и иных карт и данные дистанционного зондирования (аэро- и космические снимки) – исходные и обработанные. У исходных данных зондирования, находящихся в виде растров grey scale, атрибутивные данные как таковые отсутствуют. Результат обработки (классификации) – индексированные растры, индекс обозначает не столько цвет, сколько номер определенной категории земной поверхности (различные типы почв, лесов, болот, сельхозугодий). Описательные данные представляют собой характеристику каждой категории. Поэтому растровые данные в ГИС обычно хранятся в нескольких файлах: в одном – собственно растр (значения пикселей), в другом – данные о количестве рядов и колонок, значения категорий (заголовок растра), в третьем – палитра (цветовая таблица). Один и тот же растр может визуализироваться с разными цветовыми таблицами в зависимости от назначения и просто от предпочтений пользователей.

Растровый формат дает обзорную информацию о территории в целом. Описательные данные относятся не к отдельным объектам, а к классу, типу, категории одинаковых по каким-либо характеристикам объектов, которые могут быть пространственно разобщены.

Исключительно важный массив данных, которые содержатся в растровой форме, – это данные о рельефе местности (цифровая модель высот – digital elevation model, DEM). Соответственно в этой же форме производится и анализ поверхностей (уклон, экспозиция, геоморфология, определение границ водосборов и т.д.).

DEM – это растр, значение пиксела которого – высота соответствующей площадки земной поверхности над уровнем моря. Поскольку высоты могут превышать 255 м, для записи значения пиксела DEM необходимо больше одного байта. Если используется целочисленный формат (высота

записывается с точностью до 1 метра), нужно два байта (16 bit), если необходимы дробные значения высоты, потребуется 4 байта на пиксел (32 bit).

Все ГИС-пакеты импортируют растровые данные практически всех известных форматов. Наиболее распространенным, стандартным для растровых геоданных является формат GeoTIFF.

Методы обработки растровых данных

К растровым данным применяется множество различных операций обработки и анализа. Один из важнейших типов – обработка методом *скользящего окна*. При этом для каждого пиксела растра по определенному алгоритму рассчитывается новое значение исходя из значений его ближайших соседей, то есть по растру как бы передвигается «окно» (рис. 8), его размер может быть от 3 x 3 пиксела и более до нескольких десятков. Такой метод обработки называется также *фильтрацией* растра.

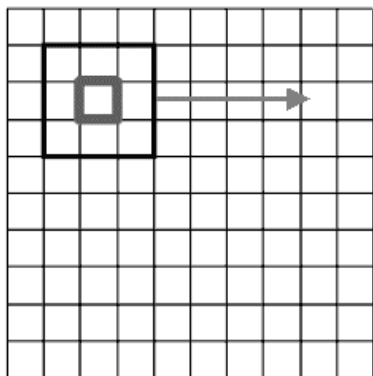


Рис. 8. Схема обработки растра скользящим окном

Цель фильтрации может быть самой различной, поэтому и разработано множество различных растровых фильтров. Простейший из них – вычисление среднего из значений всех пикселей окна. Его применение приводит к сглаживанию растра, с такой целью он используется, например, при обработке DEM, когда нужно получить более плавные формы рельефа.

Часто используется ввиду своей эффективности и универсальности простой фильтр «медиана» – значения всех пикселей окна упорядочиваются по возрастанию, и центральному пикселу присваивается значение, находящееся в середине этой последовательности. При этом исключаются экстремальные значения, но сглаживания, размывания не происходит (рис. 9), что позволяет

использовать фильтр для «очистки» растра от помех – случайных, искаженных значений, например, для обработки низкокачественных сканерных снимков.

Может использоваться фильтр «медиана» и для классифицированных снимков, в этом случае применение фильтра приводит к генерализации изображения (удалению мелких, несущественных деталей), что требуется во многих случаях после классификации снимка (рис. 10). Такого рода операции выполняются модулем GRASS *r.neighbors*.

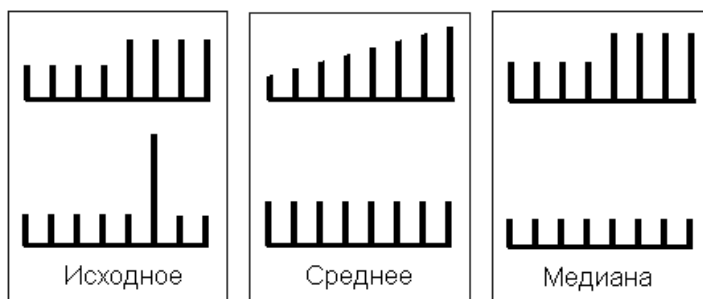


Рис. 9. Результаты применения фильтров «среднее» и «медиана» для группы соседних пикселов

Большое количество специальных растровых фильтров применяется в ландшафтной экологии для количественного анализа ландшафтной структуры (модули *r.texture* и *r.le.pixel*).

Часто используется операция построения буферных зон – полос заданной ширины вокруг различных объектов (рис. 11), выполняется модулем *r.buffer*.

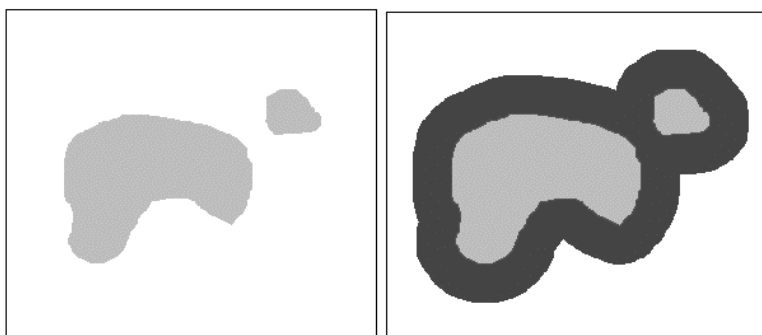


Рис. 11. Создание буферной зоны (показана черным на правом рисунке)

К растровым слоям могут применяться логические и математические операции. Часто используется операция пересчета значений (реклассификации, индексирования, ранжирования данных), например, значениям высоты от 0 до 100 м присваивается индекс 1, от 100 до 500 м – индекс 2 и т.д. Выполняется модулем *r.reclass*.

К нескольким слоям применимы логические операции. Например, необходимо выполнить запрос:

найти участки данного типа леса (категория номер 4) с величинами уклона поверхности в заданном интервале (0.1 – 0.5), находящиеся на расстоянии не более 500 м от озер.

Для реализации этого запроса необходимо иметь соответствующие растровые карты:

А – тип леса, В – уклон поверхности, С – озера.

Сначала формируется растровая карта D буферной зоны, которая получает индекс 1. Результирующая растровая карта создается с помощью модуля *r.mapcalc* путем задания выражения:

$A=4 \text{ and } B>0.1 \text{ and } B<0.5 \text{ and } D=1.$

Вектор

Для обработанных формализованных данных более удобен векторный формат. Контуры участков различных типов леса и вырубок, болот, озер и т.д. описываются полигонами; реки, дороги, линии электропередачи и т.д. – линиями.

В векторном формате описательная информация может быть локализована – соответствовать не только категориям объектов, но и каждому отдельному объекту (кадастровая информация). В этом принципиальное отличие растрового и векторного форматов данных ГИС.

Векторная форма позволяет обеспечить двустороннюю связь между картой и таблицей, то есть позволяет формировать два основных вида запросов:

– от карты к таблице – «*ЧТО здесь находится?*» (каковы невидимые на карте характеристики объекта?);

– от таблицы к карте – «*ГДЕ это находится?*» (местоположение объекта с данными характеристиками).

К данным, находящимся в векторной форме, могут быть также сформированы запросы такого рода:

– *находится ли точка с данными координатами внутри данного полигона?*

– *пересекает ли данная линия данный объект?*

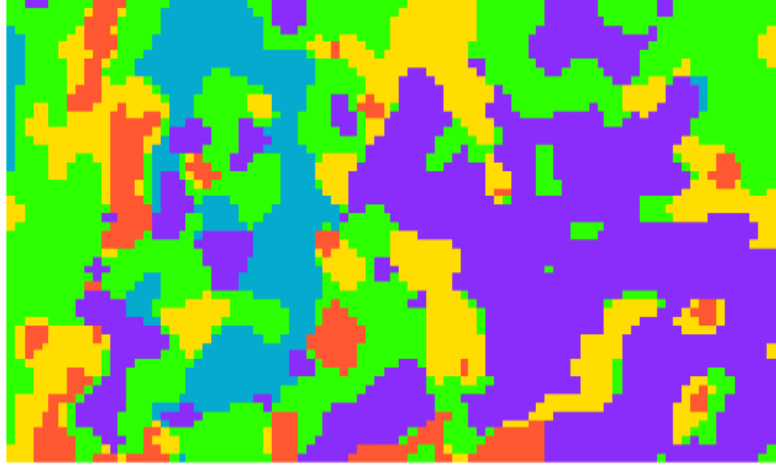
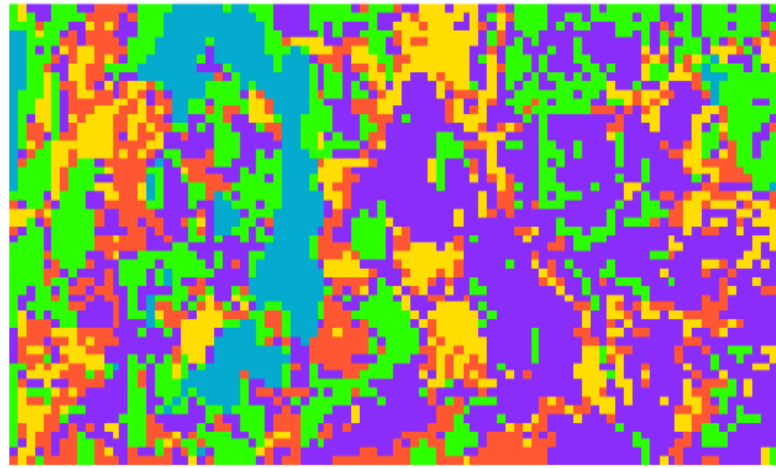


Рис. 10. Слева – классифицированный сканерный снимок, справа – он же после обработки фильтром «медиана»

Представление данных в векторной форме дает также возможность построения тематических карт по значениям атрибутов объектов.

Таким образом, векторная и растровая формы представления предназначены для различного вида анализа данных. Векторная форма обычно соответствует более высокому уровню обработки данных. Векторизовать растровое изображение (например, сканированное изображение бумажной карты или космический снимок поверхности Земли) можно в ручном режиме с помощью мыши на дисплее компьютера, вводя последовательно точки по контурам объектов, но этот способ очень трудоемок и неточен. Наиболее эффективна автоматическая векторизация специальными программными модулями – векторизаторами. При векторизации растровой карты категорий земной поверхности программа оконтуривает каждую группу пикселей одного цвета и присваивает полученному векторному полигону значение атрибута, равное индексу цвета (номеру категории).

При преобразовании векторных полигонов в растр всем пикселям, находящимся внутри полигонов с одинаковыми значениями атрибутов, присваивается индекс, равный этому значению. В пакете GRASS преобразование раstra в векторную форму осуществляет модуль *r.to.vect*, обратное преобразование – модуль *v.to.rast*.

Наиболее распространенный формат векторных данных – так называемый shape-файл (.shp), используемый в пакете ArcView, его импортируют практически все ГИС-пакеты. В каждом shape-файле могут записываться объекты лишь одного класса – или точки, или линии, или полигоны. Второй по распространенности формат – tab-файл MapInfo. Здесь в одном файле могут содержаться любые классы объектов – и точки, и линии, и полигоны. Это, с одной стороны, создает некоторые удобства для пользователей, с другой – ухудшает структуризацию данных.

Топологические и нетопологические векторные форматы

Топология в ГИС обычно определяется как пространственные взаимоотношения между смежными или близкорасположенными объектами. Математическая топология предполагает, что географические объекты располагаются на двумерной плоскости. Это означает, например, что соседние полигоны не должны взаимоперекрываться и между ними не должны оставаться «пустоты», если их нет в реальности. Также не должно быть и самопересечений полигона (когда формирующая его линия образует петлю). Такого рода корректность данных обеспечивают так

называемые топологические форматы векторных данных, используемые в профессиональных ГИС-пакетах, таких как ArcInfo, GRASS. В этом случае координаты узлов линий, общих для двух соседних полигонов, записываются один раз, а для каждого полигона указывается, из каких отрезков линий он состоит.

В более простом случае для каждого полигона записывается последовательность координат узлов образующих его линий, корректность топологии в этом случае может не обеспечиваться. Таковы форматы простых ГИС-пакетов (shape-файлы ArcView, таблицы MapInfo).

Топология многими специалистами рассматривается как одна из ключевых концепций ГИС. Однако нужно иметь в виду следующее обстоятельство. Топологические форматы возникли в основном потому, что в начале развития ГИС-технологий векторные карты создавались исключительно путем ручной или полуавтоматической оцифровки бумажных карт, в процессе которой и могли получаться нарушения топологии. Но в случае, если векторные полигоны образуются путем автоматической векторизации растровых карт, полученных в результате автоматической обработки данных ДЗ, нарушения не могут возникнуть в принципе, поскольку растр двумерен по определению. Поэтому эти данные вполне могут храниться в нетопологических форматах.

Атрибутивные данные ГИС

Для векторных слоев чаще всего атрибутивные данные содержатся в виде файлов обычных реляционных таблиц и к ним применимы все операции стандартных систем управления базами данных (СУБД). Некоторые ГИС-пакеты (ArcView, GRASS) непосредственно используют формат стандартных баз данных dbf, и все пакеты импортируют файлы форматов dbf (dBASE), xls (Microsoft Excel), mdb (Microsoft Access) и т.д.

Взаимосвязь пространственных объектов и их атрибутов обеспечивается простым позиционированием – каждый слой ГИС содержит некоторое количество пространственных объектов (точек, линий, полигонов) и таблицу атрибутивных данных, имеющую то же количество строк. В файлах данных объекты и соответствующие им строки таблиц расположены в одном порядке. Таким образом, векторный слой ГИС может быть представлен, как минимум, двумя файлами – картографическими и атрибутивными данными (в обменных форматах, например DXF, и та, и другая информация может быть записана в одном файле).

Для растровых слоев атрибутивная информация представляет собой расшифровку (легенду) цветов изображения (категорий поверхности), в виде отдельного файла.

Картографические проекции

Для обеспечения совместимости пространственных данных и растровые, и векторные слои ГИС должны быть представлены в реальной системе географических координат. В простейшем случае для векторных данных это означает, что координаты X и Y каждой точки или узла линии выражаются в градусах широты и долготы. Эта система (так и называется «широта/долгота», latlon) удобна тем, что позволяет указать местонахождение любой точки безотносительно к форме и размерам земного шара. Этот способ действительно применяется в некоторых случаях, но при этом происходят значительные искажения формы объектов (рис. 12).

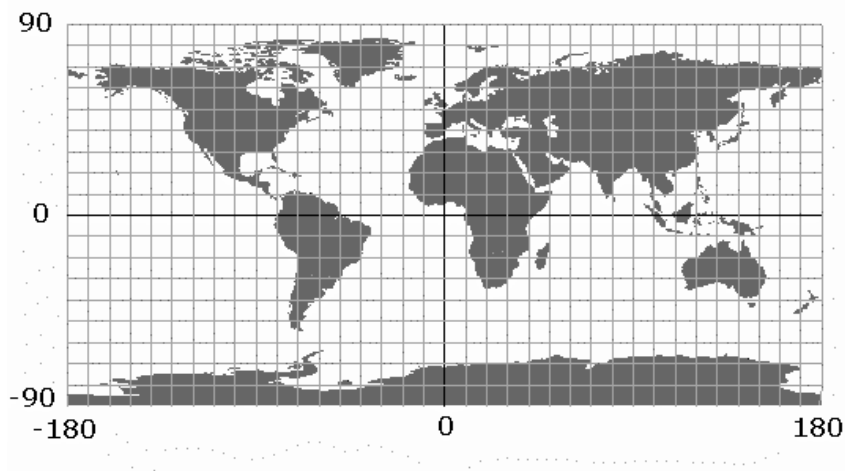


Рис. 12. Карта в проекции широта/долгота

Шарообразная форма реального небесного тела – планеты Земля – достаточно сложна и простой математической интерпретации не поддается. Называется эта форма «геоид». Для практических целей геодезии и картографии математической моделью Земли принята форма абстрактного геометрического тела – эллипсоида, образованного вращением эллип-

са вокруг одной из осей. Основные параметры эллипсоида – это величина большей (экваториальной) и меньшей (полярной) осей. Картографическая проекция – это способ, которым точки поверхности земного эллипсоида переносятся на плоскую поверхность карты – или реальную бумажную, или виртуальную поверхность электронной карты в геоинформационной системе.

Очевидно, что градусная система мало пригодна как для отображения географических объектов на бумаге, так и для их представления в ГИС. Вблизи экватора искажения от реальной формы объектов минимальны, но по мере приближения к полюсам они резко возрастают. С целью снижения искажений разработано множество различных картографических проекций и их вариантов, применяющихся для изображения земного шара в различных масштабах – всего шара, полушария, отдельных материков (рис. 13).

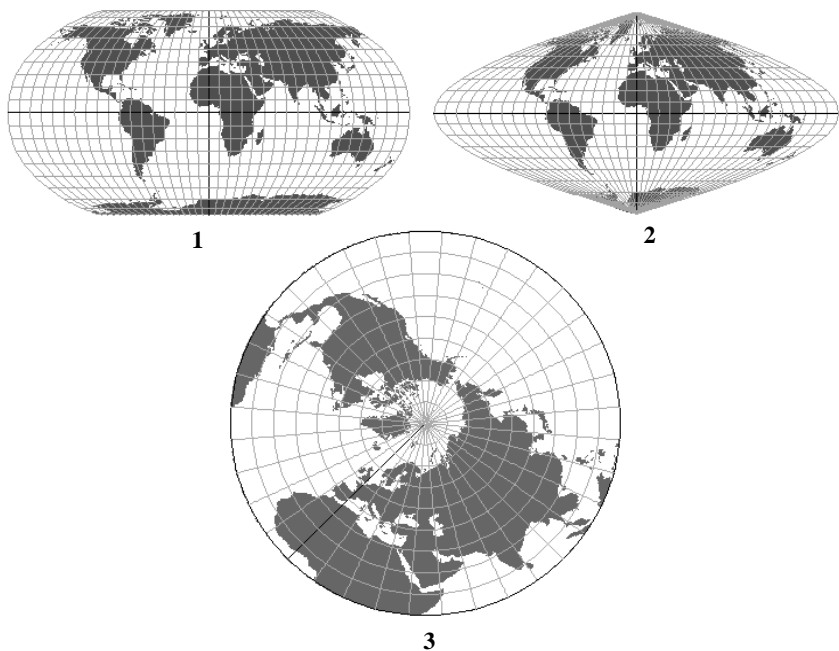


Рис. 13. Проекции: 1 – Робинсона; 2 – синусоидальная; 3 – Ламберта

Поскольку без искажений перенести шарообразную поверхность на плоскость невозможно, различные проекции ориентированы на сохранение одного из параметров:

- линейного масштаба (Equidistant, равнопромежуточные проекции);
- площадного масштаба (Equal-Area);
- углов между линиями (равноугольные проекции);
- максимально точную передачу формы объектов (конформные проекции).

В любой прямоугольной картографической проекции координаты точек измеряются в линейных единицах, как правило, в метрах. Обычно это расстояние от данной точки до экватора (координата Y) и до некоторого меридиана (координата X). Таким образом, очевидно, что конкретные значения координат зависят от параметров используемого земного эллипсоида.

Проекция UTM

Для изображения участков земной поверхности на региональном и локальном уровнях (в масштабах 1:1 000 000 – 1:10 000 и крупнее) в настоящее время в мире наиболее распространена цилиндрическая проекция Меркатора UTM (Universal Transverse Merkator). Точки земной поверхности вертикально проецируются на поверхность цилиндра, касательную к ближайшему центральному меридиану одной из 60 зон, отсчитываемых на восток от 180 меридиана (рис. 14).

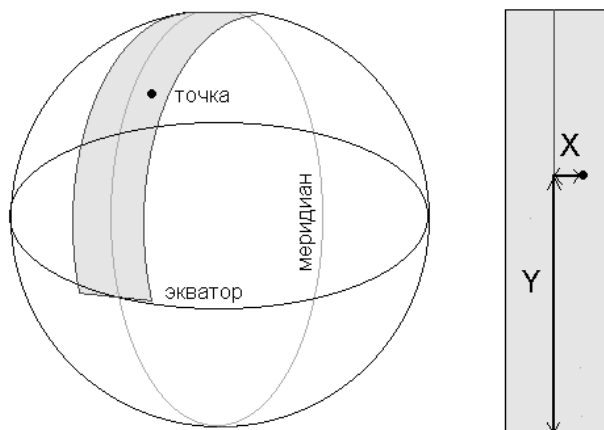


Рис. 14. Схематическое изображение проекции UTM

Координата точки X равна расстоянию от точки пересечения линии проекции с поверхностью цилиндра до центрального меридиана, а Y – расстоянию от точки пересечения до экватора.

Из «конструкции» проекции ясно, что она конформная. Параллели и меридианы в ней – сложные кривые, за исключением экватора и осевого меридиана (рис. 15), поэтому равенство углов на карте и на местности не может соблюдаться. Линейный масштаб сохраняется лишь по осевому меридиану (строго говоря, по двум равноудаленным от него в разные стороны параллельным ему линиям). Поэтому данную проекцию целесообразно применять для территорий, протяженность которых в направлении север – юг не меньше, чем запад – восток (например, для Карелии). Для крупных территорий широтной протяженности (например, России) целесообразнее применять конические проекции, в которых меридианы представляют собой прямые, а параллели – концентрические окружности:

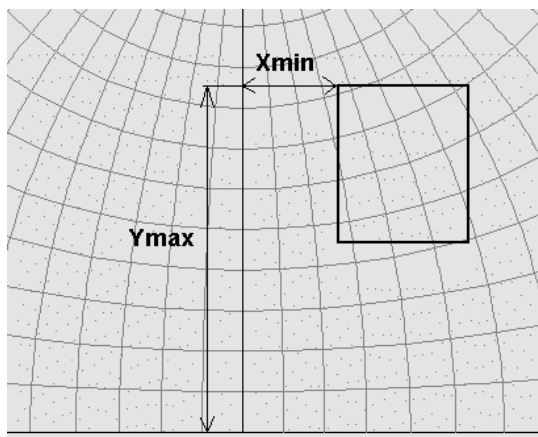


Рис. 15. Географическая привязка раstra
Размер раstra показан условно

Ширина зоны в проекции UTM составляет 6 градусов ($360/60$) долготы. Чтобы избежать отрицательных значений координат X , в проекции UTM к ним прибавляется 500 км. Так, координата X точки, расположенной на центральном меридиане зоны, равна 500000 м. Для Карелии центральный меридиан – 33-й (36-я зона, от 30 до 36 меридиана). Для координат Y применяется коэффициент 0.9996.

Значения координат точки в метрах с заданными в градусах широты/долготы координатами в одной и той же проекции будут различными в зависимости от применяемых параметров земного эллипсоида.

Эллипсоиды могут быть геоцентрическими и топоцентрическими. Параметры геоцентрического эллипсоида выбраны таким образом, чтобы обеспечить минимальные отклонения от геоида в любой точке Земли. Наиболее точные его значения обозначаются WGS-84, согласно которым радиус Земли составляет:

на экваторе – 6378137.000 м;

на полюсе – 6356752.314 м.

Таким образом, для полного описания проекции картографических данных необходимы два параметра – тип проекции и параметры используемого эллипсоида. Мировым стандартом де-факто является проекция UTM и эллипсоид WGS-84.

Параметры топоцентрических эллипсоидов обеспечивают минимальные отклонения от геоида на какой-то определенной территории. При этом меняются значения большой и малой полуосей эллипсоида, и координаты центра эллипсоида могут не совпадать с координатами геоцентрического эллипсоида. Например, для России топоцентрическим является эллипсоид, параметры которого получены в Пулковской обсерватории Ф. Н. Красовским в 1940 г. (в англоязычных ГИС-пакетах эти параметры обозначаются как Pulkovo 1942 или Krasovsky). Они составляют:

на экваторе – 6378245.000;

на полюсе – 6356953.019.

В России стандартом является несколько измененный вариант UTM – проекция Гаусса-Крюгера. Зоны в ней также шириной 6 градусов, но отсчитываются от нулевого меридиана (Гринвича), поэтому, например, 33 центральному меридиану соответствует 6-я зона, иное также значение сдвига координат долготы (для 6-й зоны – 6500 км), и коэффициент для координат Y равен единице.

Различие в параметрах эллипсоидов составляет более 100 м. Разница в расстоянии на местности между точками, имеющими одинаковые координаты в градусах, при расчете по разным параметрам эллипсоида может достигать нескольких десятков метров. Это создает некоторые неудобства, но не слишком значительные, поскольку любые цифровые картографические данные легко трансформируются из любой известной проекции в любую другую. В GRASS преобразования

проекций осуществляют модули *r.proj* – для растровых данных и *v.proj* – для векторных.

В любой проекции реальное (на поверхности Земли) расстояние между объектами всегда будет меньше, чем в плоскости проекции (за исключением расстояния по центральному меридиану в цилиндрических проекциях, где они совпадают). Поэтому в некоторых ГИС-пакетах приводятся обе величины расстояний – реальные (*spherical*) и в плоскости проекции (*cartesian*).

Географическая привязка (регистрация) растра

Для того чтобы растровое изображение (карты или аэрокосмоснимка) могло служить слоем ГИС, оно должно, во-первых, находиться в определенной географической проекции и, во-вторых, иметь географическую привязку (быть зарегистрированным в определенной системе координат). Растр по сути своей представляет собой прямоугольную систему координат (колонка/ряд). Поэтому в приведенном к проекции растре все ряды имеют одно и то же значение координаты Y, а колонки – одно и то же значение координаты X. Следовательно, для привязки (регистрации) снимка достаточно указать значения координат любого угла, обычно это верхний левый угол (координаты растра 0,0). Координата проекции Y отсчитывается от экватора, в северном полушарии – с юга на север, а координата X – с запада на восток, поэтому координаты верхнего левого (северо-западного, NW) угла обозначаются как Xmin, Ymax. (рис. 15). Для правильного позиционирования необходимо также указывать разрешение растра (размер пиксела на местности).

Информация геопривязки обычно записывается в отдельном текстовом файле, так называемом world-файле. Он состоит из шести чисел (строк):

Rwe (разрешение растра в метрах в направлении запад – восток)

0

0

Rns (разрешение растра в метрах в направлении запад – восток)

Xmin

Ymax

Вторая и третья цифры – это параметры вращения, обычно они равны нулю. В некоторых первых моделях космических сканеров пиксел имел неквадратную форму, поэтому в файл включены оба значения, в настоя-

щее время величины Rwe и Rns обычно равны (некоторые современные программы не могут корректно отобразить растр с неквадратным пикселем). Знак минус у разрешения север – юг означает, что значения в этом направлении уменьшаются.

Имя world-файла такое же, как у соответствующего растра, а расширение образуется так: берутся первая и третья буквы из расширения растра и добавляется W (bmp-bpw; tif-tfw; jpg-jgw и т.д.). Если расширение у файла растра отсутствует (в ОС UNIX, например), world-файлу дается расширение wld.

World-файл разработан компанией ESRI и используется в ее пакетах – ArcView и ArcInfo. Некоторые ГИС-пакеты используют свои форматы файла привязки. В пакете MapInfo этот файл (*.tab) должен содержать по крайней мере три точки привязки, в любом месте растра, но они не должны лежать на одной прямой. В Idrisi привязка содержится в файле документации растра и включает четыре «габаритные» координаты – минимальные и максимальные значения по осям X и Y. В файлах форматов GeoTIFF, MrSID, ECW географическая привязка записывается в самом файле, причем может быть указано не только разрешение и координаты NW угла, но и данные о проекции и эллипсоиде, то есть исчерпывающая информация регистрации растра.

Зная размер пиксела, а также количество рядов и колонок в растре, можно определить координаты любого пиксела снимка и любого его угла. Таким образом, сканерный снимок имеет две прямоугольные координатные системы – растровую (колонка/ряд) и систему координат географической проекции (X/Y).

Ректификация

В некоторых случаях возникает необходимость использования в ГИС цифровых картографических данных, находящихся в неизвестной проекции, например, сканированных аэрофотоснимков или бумажных карт, схем. Приведение таких данных в заданную проекцию называется ректификацией и выполняется методом так называемого rubber sheet-преобразования (от английского «резиновое полотно»). Для этого необходимо локализовать (определить координаты) несколько одинаково расположенных точек и на сканированном снимке, и на карте, находящейся в известной проекции, например, перекрестки дорог, четко определяемые элементы гидрографической сети, и т.д. (рис. 16).

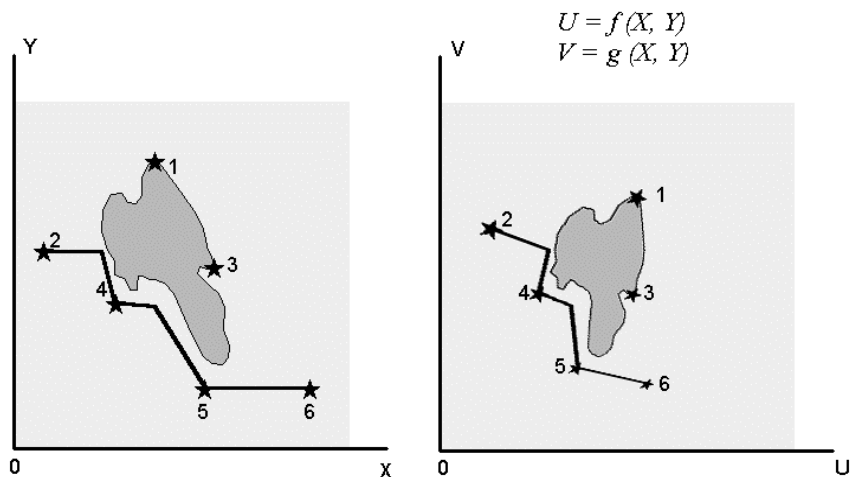


Рис. 16. Схема преобразования координат при ректификации

Координаты каждой точки (U, V) в новой системе координат определяются двумя функциями (f, g) координат (X, Y) в старой системе, то есть необходимо рассчитать уравнения регрессии от двух переменных. Обычно используются полиномы 1–3 порядков в зависимости от сложности коррекции: 1-го – для простого преобразования (поворота, масштабирования), 3-го – для корректировки сильно искаженных аэрофотоснимков (рис. 17).

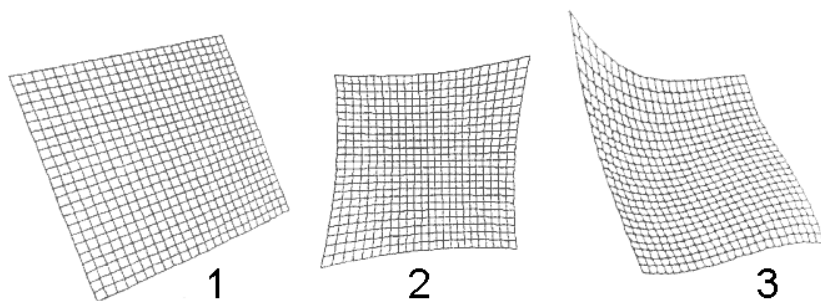


Рис. 17. Схема изменения формы исходного (прямоугольного) снимка при коррекции полиномами 1-й, 2-й и 3-й степени

Минимальное количество точек зависит от степени полинома, по которому будет производиться коррекция (для первой степени – 4, второй – 9, третьей – 16), однако желательно, чтобы точек было по крайней мере в два раза больше. Лучшие результаты получаются, когда точки равномерно располагаются по всей корректируемой площади и как можно ближе к периметру.

Если ректифицируются векторные данные, то координаты каждой точки просто пересчитываются в новую систему координат. Для растровых данных процесс более сложный.

После локализации точек коррекции необходимо задать границы географической области нового растра, и его пространственное разрешение. Таким образом задается массив точек – координат каждого пиксела раstra в новой системе координат. Затем по уравнению регрессии рассчитывается соответствующий массив координат точек в старой системе координат. Естественно, эти точки не будут совпадать с центрами пикселей старого раstra.

Можно применить несколько вариантов выбора пикселей исходного изображения для нового. Простейший вариант – взять значение ближайшего пиксела исходного изображения. Метод так и называется «ближайший сосед» (*nearest neighbor*), на рис. 18 это пиксел номер 7. Этот метод применяется для индексированных растров, а также для цифровых данных дистанционного зондирования, когда необходимо максимально сохранить исходную спектральную информацию.

Для растров *grey scale* и цветных 24-битных более пригоден метод интерполяции значений нового пиксела значениям четырех или шестнадцати ближайших пикселей. Линейная интерполяция по четырем значениям называется билинейной (*bilinear*, рис. 19).

При этом происходит некоторое «сглаживание», размытие изображения. Поэтому иногда для уменьшения этого эффекта используется интерполяция по значениям шестнадцати пикселей – кубическая (*cubic*) – по специально разработанному для этого полиному 3-й степени.

Модули ректификации включены во все ГИС-пакеты, в GRASS – это модуль *i.rectify*.

Способы интерполяции значений пикселей *nearest neighbor*, *bilinear*, *cubic* используются также при изменении проекций растров (модуль *r.proj*). Наибольшие искажения возникают при преобразовании растров, находящихся в проекции широта – долгота, в цилиндрические проекции, поскольку в этом случае сильно изменяются фактические пропорции пикселей. Более целесообразен в этом случае выбор кубической интерполяции.

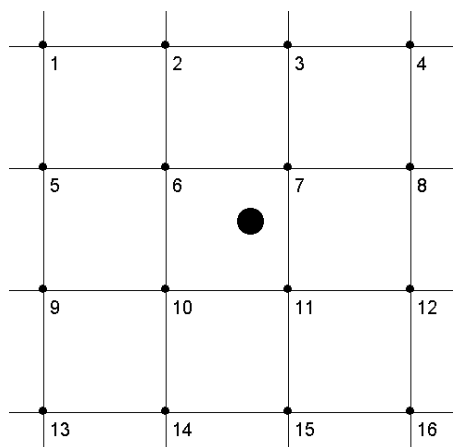


Рис. 18. Большой кружок показывает центр пиксела нового растра относительно центра в ближайших шестнадцати пикселах исходного растра

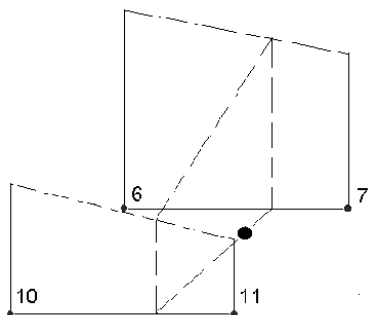


Рис. 19. Схема интерполяции билинейным методом. Высота вертикальных линий условно показывает значения пиксела 6, 7, 10, 11 и искомого

Цифровые данные дистанционного зондирования

Типы систем ДЗ

Дистанционным зондированием называется получение информации о земной поверхности с искусственных спутников Земли и летательных аппаратов (самолетов, вертолетов) путем анализа отражения электромагнитных волн – солнечного света или радиоизлучения (рис. 20). ДЗ возможно потому, что поглощение, излучение, рассеивание и отражение энергии любым конкретным типом вещества избирательны в отношении длины волны и индивидуальны для каждого вещества, поскольку определяются его атомным и молекулярным строением и структурой отражающей поверхности (Одум, 1975; Colwell et al., 1963).



Рис. 20. Черные прямоугольники показывают используемые для ДЗ диапазоны ЭМ волн

Системы ДЗ дают информацию пространственную – очертания элементов ландшафта, и спектральную – описывающую спектр отражения этих элементов, поэтому характеризуются прежде всего величинами спектрального и пространственного разрешения.

Пространственное разрешение – размер наименьшего участка земной поверхности (пиксела), на котором определяются уровни отраженной энергии, то есть какую максимальную детальность изображения позволяет получить прибор ДЗ. Чем меньше размер пиксела, тем выше пространственное разрешение.

Спектральное разрешение – это количество каналов (спектральных диапазонов), в которых ведется съемка приборами ДЗ, и частотные интервалы каждого канала, то есть насколько детальную спектральную информацию позволяет получить прибор ДЗ.

Существенное значение имеет также ширина полосы съемки (от десятков до сотен километров) и периодичность съемки одного и того же участка территории (от одного дня до двух недель).

Системы ДЗ подразделяются на пассивные и активные. К первым относятся мультиспектральные (оптические) сканеры, которые регистрируют отраженную солнечную радиацию в нескольких диапазонах – видимых и инфракрасных (табл. 1), поэтому с их помощью невозможно получить информацию о земной поверхности, закрытой облачным покровом и в темное время суток. Этому недостатка лишены активные радиолокационные системы (радары), в которых сверхвысокочастотное излучение передатчика спутника направляется на Землю и регистрируется отраженный сигнал, энергия которого зависит от пространственной структуры и диэлектрических свойств отражающей поверхности (Moor, Simonett, 1967).

Трехмерное моделирование структуры и динамики таежных ландшафтов

Таблица 1. Спектральные диапазоны (каналы) космических сканеров

Видимые	Инфракрасные
Синий, В (0.5–0.6)	Ближний инфракрасный, NIR (0.8–0.9)
Зеленый, G (0.6–0.7)	1-й средневолновый, SWIR1 (1.5–1.7)
Красный, R (0.7–0.8)	2-й средневолновый, SWIR2 (2–2.3)
	Тепловой, t° (10.5–12.5)

Примечание. В скобках – длина волны в микрометрах (мкм), у различных сканеров границы диапазонов могут несколько отличаться. Границы диапазонов показаны также столбиками на рис. 21

Радары характеризуются рабочей частотой или длиной волны. Наиболее распространены приборы, работающие в диапазонах С (5.7 см, или 5.3 ГГц – сантиметровой) и L (23.5 см, или 1.28 ГГц – дециметровый). Это радары ERS, JERS, RADARSAT и другие, снимающие полосу шириной 100–1000 км с разрешением 10–50 м. В последние годы появляются радары и более высокого разрешения.

Особенно эффективно совместное использование данных радарной и сканерной съемки, поскольку они дают информацию о различных свойствах поверхности, в связи с чем в последние годы появляются спутники, на которых установлены и оптические сканеры, и радар, например, японский ALOS.

К активным системам относятся также сканирующие лазерные дальнометры, работающие в видимом и инфракрасном диапазонах. Эти приборы устанавливаются на вертолетах и путем математического моделирования результатов сканирования создают полную трехмерную картину рельефа земной поверхности и всех расположенных на ней объектов – деревьев, зданий и т.д. с точностью до нескольких сантиметров (Данилин и др., 2005). Основным недостатком этих систем – очень высокая в настоящее время стоимость данных, в дальнейшем она, по всей вероятности, должна понижаться.

Наиболее распространенной в настоящее время технологией дистанционного космического зондирования является многоспектральное сканирование (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики наиболее распространенных космических сканеров

Сканер	Страна	Диапазоны	Полоса съемки, км	Разрешение, м
Landsat	США	B, G, R, NIR, SWIR1, SWIR2, t°	180	30 (15*)
IRS	Индия	G, F, NIR, SWIR1	160	25
SPOT	Франция	G, F, NIR, SWIR1	60	20 (10)
Ikonos	США	B, G, R, NIR	60	4 (1)
QuickBird	США	B, G, R, NIR		2.4 (0.6)

* В скобках указано разрешение панхроматического (соответствующего всему видимому диапазону, 0.5–0.8 мкм) канала сканера.

Особенности спектра отражения растительного покрова

Сканеры пригодны для дистанционного зондирования структуры и состояния растительного покрова благодаря особенностям спектра отражения растительности. Лист как оптическая система отличается чрезвычайно сложной структурой на всех уровнях – тканевом, клеточном, молекулярном (Горышина, 1979). В видимой и ближней инфракрасной областях спектра покровы листа (кутикула и эпидермис) отражают и излучают слабо и не очень селективно. Хлорофилл поглощает более 80% энергетически насыщенных синего (B) и красного (R) участков видимого спектра, значительная часть зеленого (G) света отражается (рис. 21).

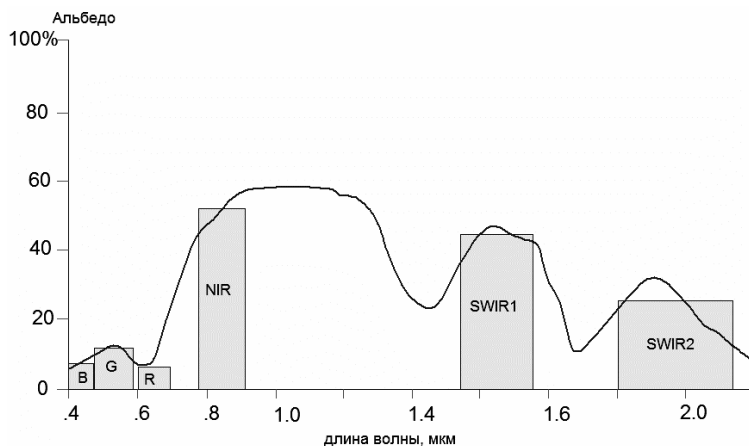


Рис. 21. Спектр отражения зеленой растительности и спектральные диапазоны сканера Landsat-TM (по: Sabins, 1987)

Максимально отражение листа в ближнем инфракрасном диапазоне, что объясняется изменением коэффициента преломления в губчатой паренхиме между воздухом в межклеточных пространствах и гидратированной целлюлозой клеточных стенок. Это является эволюционно выработанным приспособлением для предотвращения перегрева листовой пластинки на солнце.

Коэффициенты отражения в каждом диапазоне спектра зависят от состава тканей растения, морфологии побега, возраста, условий произра-

стания. Изменения в спектре отражения свидетельствуют об изменениях в физиологическом состоянии растительности (количество зеленой биомассы, структура тканей листа, геометрия и тургор клеток, водный режим, содержание пигментов – хлорофиллов, каротиноидов). Так, при уменьшении зеленой биомассы снижается коэффициент отражения в ближней инфракрасной области спектра, поскольку снижается количество «отбрасывающей» это излучение губчатой паренхимы. Это позволяет определять участки повреждения лесов насекомыми-вредителями, аэротехногенными выбросами и иными естественными и антропогенными факторами.

Различия в водном режиме растений наиболее сильно проявляются в средневолновом инфракрасном диапазоне (SWIR). Соответственно по отражению в этом диапазоне можно выделить различные типы растительности, приуроченные к различным по влажности условиям произрастания.

Данные особенности спектра отражения растительности используются в так называемых спектральных индексах – величинах, рассчитываемых исходя из значений различных каналов сканеров. Наиболее широко применяется так называемый вегетационный индекс NDVI, Normalized Difference Vegetation Index (Tucker, 1979; Sabins, 1987). Индекс рассчитывается как разность значений отражения в ближней инфракрасной и красной областях спектра, деленная на их сумму. В результате значения NDVI меняются в диапазоне от -1 до 1 . Для зеленой растительности отражение в красной области всегда меньше, чем в ближней инфракрасной, за счет поглощения света хлорофиллом, поэтому значения NDVI для растительности не могут быть меньше 0 , а максимальное значение индекса будет в участках с максимальным количеством фотосинтезирующей биомассы.

Для выявления участков с различными гидрологическими условиями используется также спектральный индекс стресса влажности – MSI, moisture stress index, равен отношению каналов SWIR1 и NIR (Rock et al., 1985).

Кривая спектрального отражения называется «*сигнатура*» (от английского signature – подпись). Сканеры регистрируют форму сигнатуры в нескольких ее участках в каждом пикселе снимка в виде последовательности чисел, соответствующих уровням сигнала по каналам (рис. 22, 23).

2. Основные принципы и методы гис-технологий

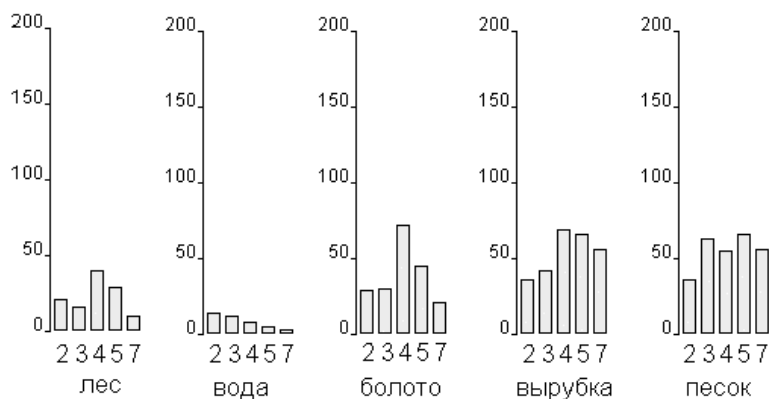


Рис. 22. Примеры типичных сигнатур различных категорий земной поверхности в виде диаграмм пяти каналов сканера Landsat 7 (2-G, 3-R, 4-NIR, 5-SWIR1, 7-SWIR2). Ось ординат – уровень сигнала датчика сканера

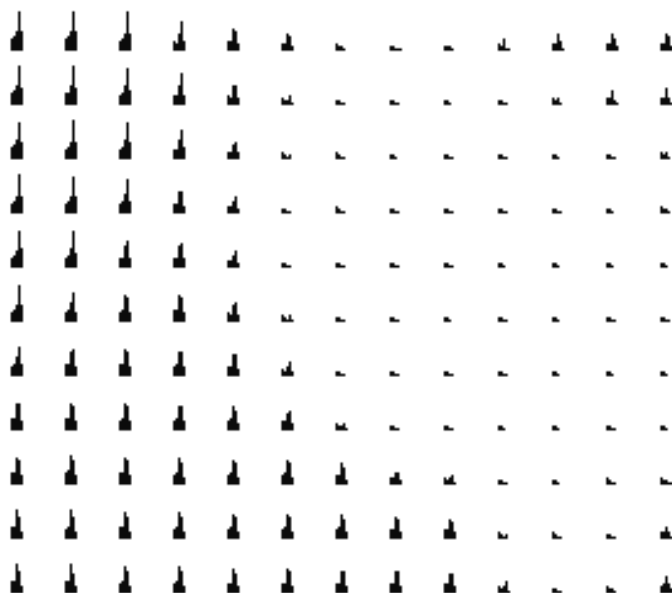


Рис. 23. Схематическое изображение фрагмента сканерного снимка как растра сигнатур

Регистрируемые сканером значения уровней отражения зависят от многих факторов. Прежде всего это прозрачность атмосферы, которая зависит от длины волны отраженного излучения. Существуют области повышенного поглощения лучей атмосферой (1.3–1.5 и 1.6–1.8 мкм), в которых кривая спектрального отражения резко идет вниз, поэтому диапазоны каналов сканера выбраны таким образом, чтобы соответствовать «окнам прозрачности» (см. рис. 21).

Уровень сигнала датчика сканера определяется соотношением отражательной и поглощательной способности поверхности (альбедо) Земли, а также углом между источником освещения, регистрирующим прибором и поверхностью, который в свою очередь зависит от высоты солнца над горизонтом, рельефа земной поверхности и угла сканирования (рис. 24).

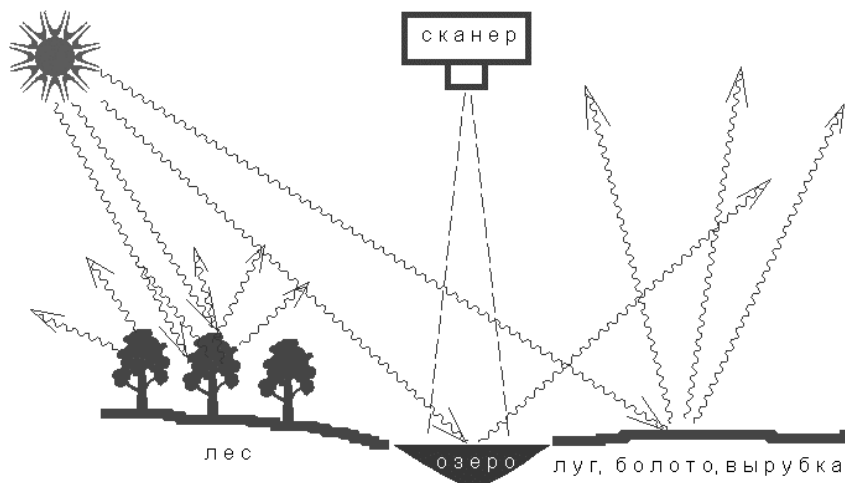


Рис. 24. Схема отражения солнечного излучения от основных категорий земной поверхности

Высота Солнца в северных широтах даже в период летнего солнцестояния не превышает 50 градусов, а сканирование производится вертикально или с небольшим отклонением от вертикали.

Лесной полог отличается большой неровностью поверхности, и значительная часть и видимого, и инфракрасного излучения поглощается, поэтому лес на сканерном снимке выглядит темным. Как и для всех типов

растительного покрова, в ближнем инфракрасном диапазоне отражение максимально.

Водная поверхность гладкая, действует как зеркало, и большая часть излучения отражается (Лабутина, 2004). Кроме того, значительная часть излучения поглощается водой (по мере перехода от видимого диапазона к инфракрасному поглощение увеличивается), поэтому на снимке вода наиболее темная.

Ровные поверхности, покрытые травянистой растительностью (болота, вырубки, сельхозугодья), поглощают значительно меньшее количество излучения, чем лесной полог, поэтому на снимке получают самыми светлыми, особенно в ближнем инфракрасном диапазоне.

Ровные поверхности, не покрытые растительностью (например, пески), также выглядят на снимках более светлыми, но без больших различий в видимых и инфракрасных диапазонах.

Искажения информации космического сканирования

Вследствие кривизны поверхности Земли, ее вращения вокруг собственной оси и перемещения самого сканера по орбите отклонения угла сканирования от вертикали прямоугольный растр, полученный космическим сканером, в реальности (на поверхности Земли) представляет собой фигуру сложной формы (рис. 25).

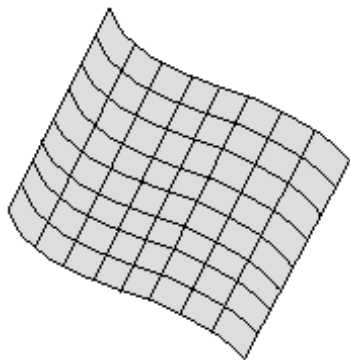


Рис. 25. Реальная форма фрагмента полосы сканерной съемки на поверхности Земли

Искажения на рисунке для наглядности значительно преувеличены, в действительности для большинства сканеров кривизна линии сканирования составляет не более нескольких метров на километр протяженности.

Тем не менее на первой стадии сканерный снимок геометрически искажен. Поскольку все величины, приводящие к данным искажениям (параметры орбиты сканера, форма и скорость вращения Земли), известны, геометрические искажения легко устраняются путем математической обработки, в результате которой сканерный снимок будет представлять собой точную географическую карту в заданной проекции. Эти преобразования осуществляются на приемной станции. Но для достижения максимальной точности, до нескольких метров и менее, необходима дополнительная привязка снимка к точкам на местности, координаты которых определены по приборам GPS. Эта окончательная привязка, как правило, при необходимости осуществляется уже конкретными пользователями снимков.

Искажения, вызванные различной чувствительностью датчиков сканера к волнам различной длины и различным пропусканием этих волн атмосферой, называются радиометрическими. Приводящие к ним факторы более сложны, чем в случае геометрических искажений. Однако существуют методы, позволяющие в значительной степени устранить влияние и этих искажений, – радиометрическая коррекция. Обычно потребителям сканерные снимки поставляются и геометрически, и радиометрически скорректированными, хотя по желанию пользователей могут предоставляться и некорректированные.

Форматы файлов сканерных снимков

Информация сканирования может быть записана в четырех основных типах форматов:

1. В формате, аналогичном формату обычного растрового файла цветного изображения (True color-RGB), например, BMP, в котором для каждого пиксела снимка записываются последовательно байты, соответствующие уровням всех каналов. Этот формат называется BIP (Band Interleaved by Pixel).

2. В формате BIL (Band Interleaved by Line) каналы чередуются построчно – сначала первые строки всех каналов, затем вторые и т.д.

3. Растры всех каналов записываются последовательно, этот формат называется BSQ (band sequential).

4. Каждому каналу соответствует отдельный файл grey scale, все файлы имеют соответственно одинаковое число рядов и колонок. В этом случае файлы обычно записываются в формате GeoTIFF, ставшим стандартом де-факто для растровой геоинформации. В этом же формате в одном файле могут записываться сразу несколько каналов, по типу BIP, BIL или BSQ.

Визуализация сканерного снимка

Простейший способ использования информации сканирования – это его визуализация в виде растрового изображения. Так, если создать растр из одного какого-либо канала снимка, получим изображение в градациях серого (grey scale). Файл формата GeoTIFF, в котором записан один из каналов сканерного снимка, можно просто открыть в графическом редакторе, например PhotoShop. Если это исходный, необработанный, снимок, изображение будет очень темным. Объясняется это тем, что значения уровней сигнала невелики, обычно не превышают 100 – 150 в самом ярком – ближнем инфракрасном канале – верхняя гистограмма на рис. 26 (гистограмма показывает относительное количество пикселей с данным уровнем яркости во всем снимке).

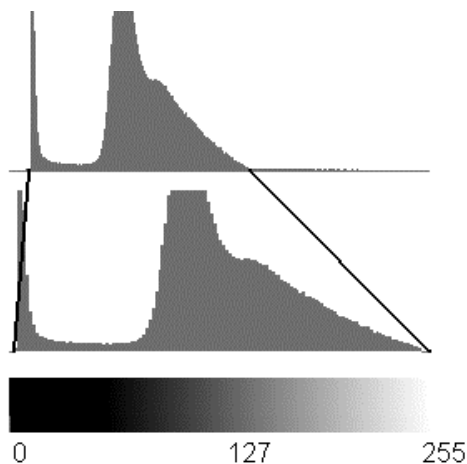


Рис. 26. Схема преобразования яркости

Повысить визуальную «читаемость» снимка можно с помощью ручной или автоматической настройки яркости. Она заключается в «растягивании» гистограммы – каждое значение яркости пересчитывается таким образом, чтобы минимальное значение исходной гистограммы оказалось равным нулю, а максимальное – 255 (рис. 26, нижняя гистограмма).

RGB-синтез

Визуальная информативность каждого отдельно взятого канала очень невелика. Она многократно повышается, если взять какие-либо три канала снимка и создать из них цветное 24-битовое изображение в

искусственных цветах. Эти операции можно выполнить, например, с помощью редактора PhotoShop, операция Merge Channels (Склеить каналы). Все три файла должны быть одного размера и в режиме greyscale. В этом случае также необходима автоматическая или ручная подстройка яркости по каждому каналу.

Синтезировать цветное изображение можно из любых трех каналов. Такое изображение называется «false color» (в искусственных цветах, псевдоцветное). Обычно для снимков Landsat используют каналы 2, 4, 7 (G, NIR, SWIR2), соответственно как синий, зеленый, и красный.

В этом случае будут максимально контрастно представлены все категории земной поверхности – растительные, нерастительные и водные. Если же необходимо выделить преимущественно растительные категории, более целесообразно использовать для этого инфракрасные каналы, так как именно в этих участках спектра более всего проявляются различия между типами растительного покрова (рис. 27). Синтезированные таким образом изображения могут использоваться для получения разного рода обзорной информации о территории (см. рис. 59 и 60, слева и в центре).

Повышение разрешения сканерного снимка с использованием панхроматического канала

Для снимков сканеров, имеющих канал в панхроматическом диапазоне, пространственное разрешение которого обычно в 2–4 раза выше, чем спектральных каналов, возможно некоторое визуальное повышение разрешения RGB-синтезированных изображений методом преобразования RGB – HIS – RGB.

Выбранные для синтеза каналы преобразуются в модель HIS (модуль *i.rgb.his*). Получается три растра – I, H, S. Растры, соответствующие величинам H и S, приводятся к разрешению панхроматического канала, то есть число рядов и строк растра увеличивается в соответствующее число раз – два или четыре (модуль *r.resample*). При этом каждому пикселу спектральных каналов будет соответствовать четыре или шестнадцать пикселей панхроматического канала, что и позволяет визуально повысить детальность снимка.

При обратном преобразовании HIS в RGB (модуль *i.his.rgb*) в качестве яркостного канала I используется панхроматический растр. Затем из полученных файлов синтезируется RGB-изображение. Пример результатов такого синтеза приведен на рис. 28.

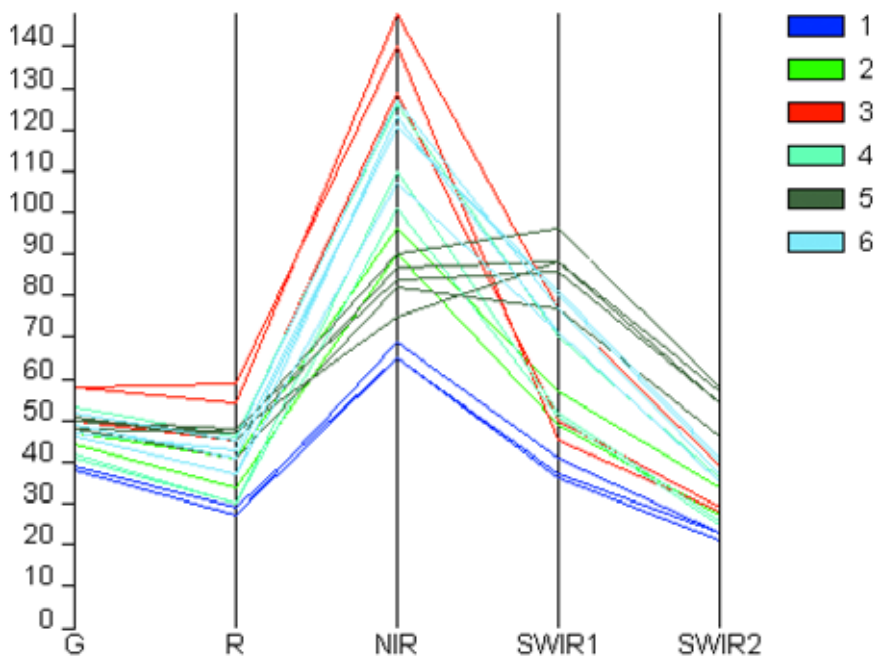


Рис. 27. Сигнатуры различных категорий растительного покрова (1–6) на снимке Landsat 7. Наибольшая вариация в каналах NIR и SWIR

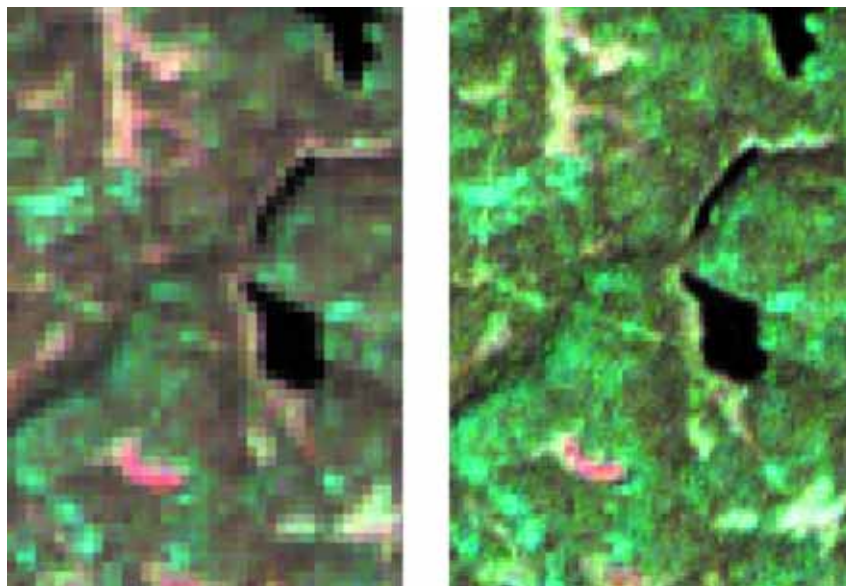


Рис. 28. Слева – RGB-синтез из инфракрасных каналов с разрешением 30 м, справа – RGB – HIS – RGB-синтез с использованием панхроматического канала с разрешением 15 м

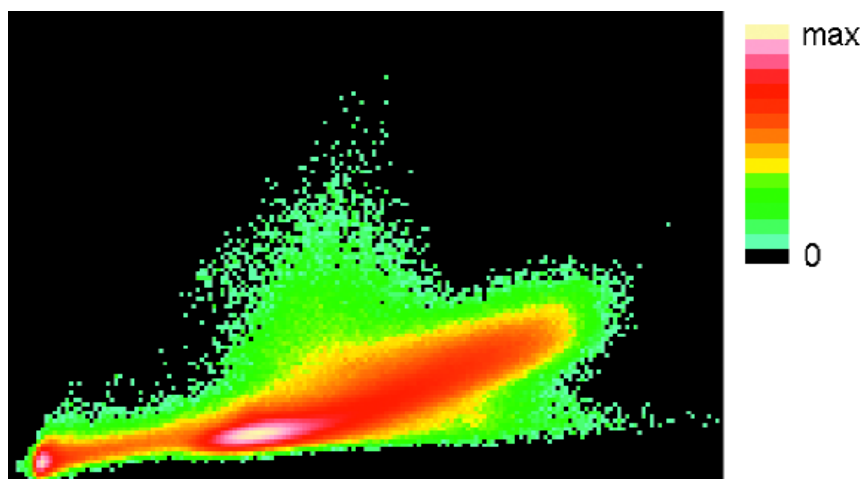


Рис. 29. Относительная плотность пикселей в двухмерном спектральном пространстве каналов NIR (ось X) и R (ось Y)

3. КЛАССИФИКАЦИЯ СКАНЕРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Визуализация снимка способом RGB-синтеза (примеры на см. рис. 59 и 60, слева и в центре) дает лишь обзорную информацию. Для того чтобы получить количественные показатели, например, площадь вырубок, ход процесса лесовосстановления и т.д., снимок необходимо классифицировать, то есть выделить участки (контуры), соответствующие данным категориям. Если необходимы данные по каждому отдельному объекту – участку вырубки, ветровала и т.д., контуры должны быть векторизованы (см. рис. 59, 60, справа). Принцип классификации основан на предположении, что сходные по биологическим характеристикам категории поверхности должны иметь и сходные по форме сигнатуры. Технически процесс заключается в том, что программа пиксел за пикселем прочитывает весь файл снимка, анализирует по выбранному алгоритму сигнатуру каждого пиксела и относит его к определенной категории, которой присваивается какой-либо заданный цвет. Таким образом, результат классификации представляет собой индексированное изображение, на котором различными цветами обозначаются различные категории земной поверхности и типы растительного покрова. Отметим, что при классификации используется вся содержащаяся в снимке информация, тогда как для RGB-синтеза – лишь три канала, а информация остальных остается невостребованной.

По своей сути классификация аналогична описанной в первой главе индексации RGB-растров. Как в том случае, большое количество триад уровней «сжимается» до ограниченного числа цветов палитры, так и при классификации множество сигнатур разбивается на конечное число классов категорий земной поверхности.

Существует большое количество методов классификации. Во многих из них используется понятие *спектрального пространства*.

Спектральное пространство

Аналогично тому, как каждый цвет RGB-изображения занимает в цветовом пространстве место, определяемое значением уровней R, G и B (см. рис. 4), каждая сигнатура сканерного снимка занимает в *спектральном пространстве* место, определяемое уровнями сигналов каждого канала. Размерность спектрального пространства снимка равна числу каналов сканера. Более чем трехмерное пространство (гиперпространство) представить сложно, однако с математической точки зрения размерность

не имеет значения – все операции с объектами выполняются одинаково – и для двухмерного, и для многомерного пространства.

Сигнатуры всех пикселей снимка образуют в спектральном пространстве «облако» с различной плотностью точек: чем больше на снимке пикселей с определенной сигнатурой, тем плотнее группируются там пиксели. В двухмерном пространстве точки снимка с относительно однородной территорией формируют фигуру, близкую к эллипсу (рис. 29). Соответственно формируемое в многомерном пространстве «облако» называется *гиперэллипсоидом*.

Традиционные методы классификации

При классификации цифровых данных сканирования применяются два основных принципиально отличающихся подхода – управляемая (*supervised*) и неуправляемая (*unsupervised*) классификации. Первый подход представляет собой экстраполяцию спектральных характеристик (сигнатур) предварительно исследованных наземных ключевых участков на всю территорию, охваченную сканерным снимком. При втором подходе классификация проводится без учета наземных данных, исходя из внутренних закономерностей организации многомерной матрицы снимка. Развитие этого подхода началось сразу после появления космических сканеров (Ball, Hall, 1966; Sammon, 1969), возможно, потому, что для таких «теоретических» исследований натурные данные не нужны. Управляемая классификация начала получать распространение значительно позднее, когда сканерные снимки и программные средства для их обработки стали доступны для широкого круга исследователей-практиков.

Но и до настоящего времени во многих исследованиях используется неуправляемая классификация (Kohonen, 1997; Тутубалина, Шипигина, 2003; Барталев, Исаев, 2004). Методы неуправляемой классификации реализованы во всех пакетах обработки сканерных снимков. Это метод кластерного анализа (пакеты Idrisi, GRASS), метод последовательной самоорганизации данных ISODATA (Erdas) и близкий к нему Isoclust (Idrisi) и их варианты.

В этих методах наземным данным отдается вторичная роль, то есть сначала проводится классификация снимка, а затем при проведении полевых исследований предпринимаются попытки выяснить, что же соответствует в действительности выделенным категориям. Такой подход в принципе может оказаться полезным при первичном изучении территории, для выделения однородных по каким-то априори неизвестным характеристикам участков и планирования дальнейших исследований. Однако для целей

детального изучения структуры и динамики ландшафтов результаты неуправляемой классификации непригодны по следующим причинам.

Во всех этих методах изначально задается некоторое произвольно выбираемое количество классов (категорий земной поверхности), что неминуемо вносит искажения в реальную организацию спектрального гиперпространства. Иногда в качестве «ядер конденсации» (seed cluster) используется композитное RGB-изображение. Эти категории необходимо как-то назвать (выделить семантические классы), а затем тем или иным способом определять, что же соответствует в природе этим названиям, то есть в любом случае необходимы натурные обследования. Кроме того, в большинстве случаев простое RGB-изображение для обзорных целей значительно более информативно и легче интерпретируется, чем результат любой неуправляемой классификации.

По этим причинам более целесообразно использовать методы контролируемой (синоним: управляемой) классификации.

Методы управляемой классификация

При управляемой классификации экспериментально определенные на местности параметры ключевых участков экстраполируются на сходные по сигнатурам участки всего снимка. Со снимка снимаются спектральные характеристики пикселей, соответствующих ключевым участкам, и программа согласно выбранному алгоритму относит данный пиксел к какой-либо заранее заданной категории. Локализация ключевых участков проводится визуально по RGB-изображению или с использованием приборов GPS.

Нужно отметить, что управляемая классификация при недостаточном количестве натурных данных, включающих лишь часть присутствующих на всем снимке категорий поверхности, в зависимости от используемого конкретного метода дает либо совершенно ложные результаты для значительной части территории, либо оставляет на ней «белые пятна». Однако, если ключевые участки представляют все основные категории земной поверхности с точки зрения структуры и состояния растительного покрова, управляемая классификация обеспечивает получение наиболее полной и достоверной информации.

Задача контролируемой классификации сводится к нахождению максимально точного математически выраженного соответствия между формой сигнатуры и качественной характеристикой (категорией) ключевого участка. Для этого применяются несколько методов, рассмотрим наиболее распространенные, реализованные в большинстве пакетов обработки данных ДЗ.

Метод параллелепипедов (пакеты Idrisi, Erdas и др.). При классификации этим наиболее простым методом задаются максимальные и минимальные уровни сигнала по каналам для каждой категории (рис. 30). Пиксел относится к определенной категории только в том случае, если уровни его сигналов по всем каналам попадают в интервалы, заданные для данной категории. Иначе говоря, определяется, в каком из заданных гиперпараллелепипедов многомерного спектрального пространства снимка находится данный пиксел. Если пиксел не попадает ни в один гиперпараллелепипед, он относится к категории «все остальное».

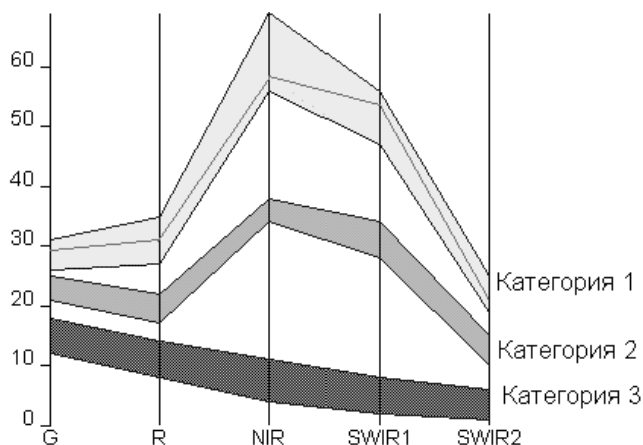


Рис. 30. Интервалы категорий: болото (1), лес (2) и вода (3)

Простейший вариант этого метода – выделение категорий по уровням всего двух каналов, например, наиболее информативных для растительного покрова красного и ближнего инфракрасного (рис. 31).

Даже таким простейшим методом можно получить со сканерного снимка важную информацию (рис. 32). Однако данный метод пригоден для выделения только достаточно контрастных по спектральным характеристикам категорий земной поверхности (вода, лес, свежая вырубка), поскольку при менее выраженных различиях один и тот же пиксел может оказаться в различных категориях, или, наоборот, достаточно близкий к какой-либо категории – не войти в нее.

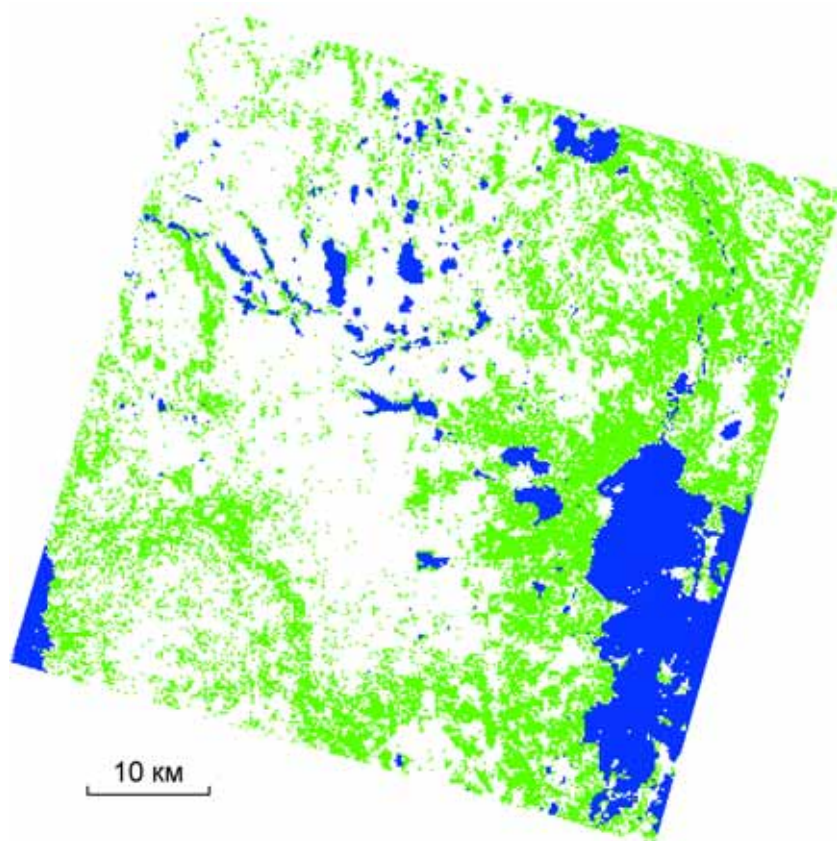


Рис. 32. Классифицированный снимок сканера SPOT 1997 г.

По соотношению каналов NIR и R выделены зеленым цветом спелые хвойные леса, сохранившиеся преимущественно в защитных полосах крупных рек и озер

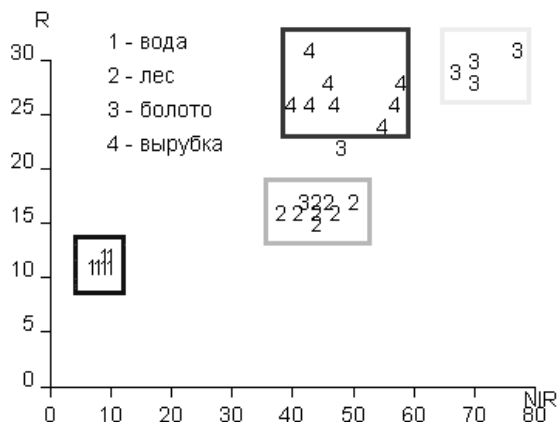


Рис. 31. Выделение категорий земель по двум каналам

Несколько лучшие результаты может дать метод *пространства признаков* (*feature space* в терминологии Erdas, в данном случае это синоним спектрального пространства – *spectral space*). Отличие от метода параллелепипедов заключается в том, что задаются не прямоугольные, а произвольной формы границы категорий (рис. 33).

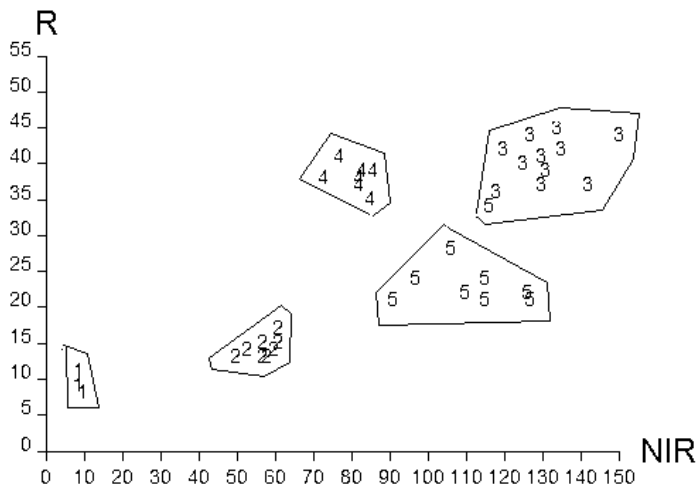


Рис. 33. Классификация методом *feature space*

Это позволяет точнее определить границы категорий в спектральном пространстве и соответственно – на классифицированном снимке. Однако и в этом случае, поскольку используется информация лишь двух каналов, удовлетворительно выделяются контрастные категории, а схожие по спектральным характеристикам, например, участки леса, достаточно различные по типу и возрасту, не различаются этим методом. В таких случаях иногда более пригоден метод наименьшего расстояния.

Метод наименьшего расстояния (minimum distance) заключается в том, что для каждой категории задаются не интервалы, а конкретные значения уровней сигналов по каналам (центры категорий в спектральном пространстве), для каждого пиксела снимка рассчитывается евклидово расстояние (квадратный корень из суммы квадратов отклонений по каждому каналу) последовательно до центров всех заданных категорий, и пиксел относится к той категории, расстояние до которой наименьшее (рис. 34).

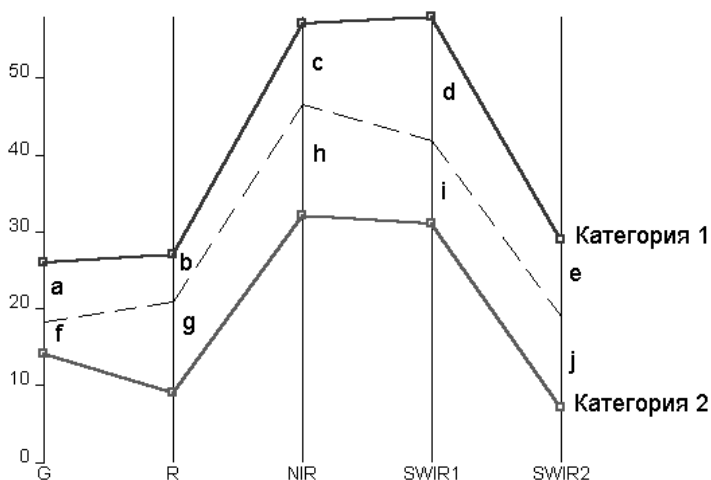


Рис. 34. Принцип классификации методом наименьшего расстояния. Категория, к которой будет отнесен пиксел, спектральная характеристика которого показана пунктиром, определяется сравнением величин S1 и S2:

$$S1 = a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2$$

$$S2 = f^2 + g^2 + h^2 + i^2 + j^2,$$

если $S1 < S2$, то – к категории 1, если $S1 > S2$, то – к категории 2

В отличие от метода параллелепипедов, при котором из всех пикселей снимка выбирается лишь удовлетворяющий заданным условиям, при классификации методом наименьшего расстояния каждый пиксел снимка будет отнесен к той или иной категории. Поэтому при отсутствии данных ключевых участков для какой-либо достаточно распространенной на данной территории категории возможны ошибки, иногда сильно искажающие реальную картину. Можно экспериментально определить и установить некоторое максимальное значение расстояния, при превышении которого пиксел будет отнесен к категории «все остальное», но в этом случае на снимке останутся «белые пятна», как и при классификации методом параллелепипедов.

Выделяется столько классов, сколько было задано ключевых участков, и все спектральное пространство делится между центрами классов аналогично тому, как формируются полигоны Вороного (рис. 35), тогда как в действительности вряд ли возможно, чтобы в живой природе объекты, пусть и виртуальные, имели строго прямолинейные границы.

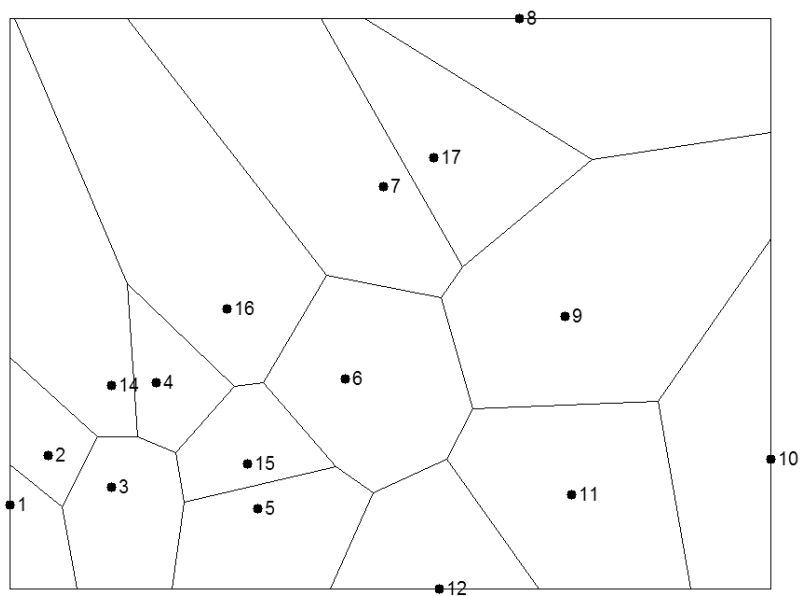


Рис. 35. Схема деления спектрального пространства между категориями при классификации методом наименьшего расстояния

В принципе можно предположить, что этот метод может дать достаточно достоверные результаты при условии, что будет найдено столько ключевых участков, сколько категорий поверхности существует в реальности. Задача усложняется тем, что категории занимают различные по «объему» области в спектральном пространстве и для некоторых категорий должно быть задано несколько центров для каждой. В любом случае этим методом крайне трудно определить правильное положение границ между категориями. Тем не менее метод минимального расстояния в некоторых случаях может быть очень эффективен, прежде всего благодаря своей высокой чувствительности при разделении близких по форме сигнатур.

Метод наибольшего подобия

При классификации этим методом (*maximum likelihood classification, MLC*) необходимо статистически достоверное количество сигнатур ключевых участков для каждой категории. При определении, к какой категории будет отнесен каждый пиксел, учитывается плотность вероятности принадлежности пиксела к той или иной категории, то есть метод является вариантом дискриминантного анализа. Принято считать этот метод наиболее достоверным (Richards, Xiuping, 1999), он включен практически во все пакеты обработки, в GRASS это вообще единственный метод собственно управляемой классификации (модуль *i.maxlik*). Однако, как отмечают многие исследователи, приемлемая достоверность классификации этим методом достигается только при достаточно большом количестве правильно подобранных ключевых участков (Шаталов и др., 2007). Использование этого метода, особенно авторами, область научных интересов которых далека от естественно-географической, приводит не только к неточным, но и просто абсурдным результатам. Так, в одной работе (Замятин, 2006) всерьез утверждается, что на некотором участке Ямало-Ненецкого национального округа в период с 2000 по 2002 год произошло увеличение площади «мшистых болот» на 59.6 кв.км. Поскольку скорость горизонтального роста торфяной залежи в наиболее благоприятных условиях составляет несколько сантиметров в год, получается, что периметр этих болот должен составлять несколько десятков тысяч километров, то есть значительную часть земного экватора.

Нужно отметить, что дискриминантный анализ по сути своей предназначен для дифференциации объектов (или явлений), различия между которыми не очевидны (Ивантер, Коросов, 2003). Классификацию же скалярного снимка представляется более целесообразным проводить после

исследования форм сигнатур, которые определяются свойствами категорий земной поверхности. Применение вероятностных методов в этом случае может и не потребоваться.

Прочие методы контролируемой классификации менее распространены. При использовании *метода регрессионного анализа* рассчитывается уравнение регрессии между спектральными характеристиками и характеристиками ключевых участков, и при классификации таксационные показатели древостоя (средний диаметр, высота, объем ствола) определяются как функции уровней каналов и их соотношений (спектральных индексов):

$$Dcp, Hcp, V, \dots = f(B, G, R, NIR, SWIR1, \dots, NIR/R, \dots).$$

Таким образом, результаты управляемой классификации, во-первых, в значительной степени зависят от конкретного метода и, во-вторых, в еще большей степени определяются количеством и качеством ключевых участков. Хотя существуют методы, облегчающие подбор ключевых участков путем анализа сигнатур, например, модуль *i.class* пакета GRASS, интерактивно оценивающий пригодность выбранного участка для классификации, при необходимости выявления достаточно сложной ландшафтной структуры рано или поздно оказывается, что методы управляемой классификации в данном случае неэффективны. Не случайно во многих статьях, касающихся классификации сканерных снимков, встречается термин «перепутывание» различных категорий земной поверхности.

Проблема в том, что эти методы дают результаты с той или иной степенью статистической достоверности, то есть определенный процент *площади* каждой категории соответствует категории ключевого участка, действительная же *форма* объектов при этом искажается, поэтому результаты классификации практически непригодны для изучения ландшафтной *структуры*.

Контекстные классификации

Существуют методы классификации, в которых определенным образом учитывается категория не только каждого отдельного пиксела, но и соседних с ним (контекста). Это методы SMAP (sequential maximum a posteriori) (Bouman, Shapiro, 1992, 1994), реализованный в пакете GRASS (модуль *i.smap*), и ECHO (Extraction and Classification of Homogeneous Objects, программа MultiSpec). Эти методы также не могут быть признаны приемлемыми для выявления ландшафтной структуры. В некоторых случаях они дают на первый взгляд достаточно достоверную картину, но при детальном рассмотрении обнаруживается значительное количество серьезных ошибок. Практически эти классификации объединяют два

принципиально различных процесса – собственно классификацию и анализ текстуры.

Метод нейронных сетей, по сути дела, относится к методам неуправляемой классификации, поскольку сначала в спектральном пространстве производится построение искусственной нейронной сети, а уже затем ее тематическая интерпретация (Программа..., 2005). Утверждается, что при использовании обученной нейронной сети «с высокой точностью идентифицируются одни и те же классы на разновременных снимках» (Замятин, 2003). Возможно, в некоторых случаях это действительно целесообразно. Однако применительно к целям ландшафтной экологии это приводит лишь к искажению реальной картины – практически все категории растительного покрова на снимках, сделанных в разные сезоны, будут иметь *разные* сигнатуры вследствие различного освещения и фенологической фазы, и анализ именно этих различий увеличивает достоверность классификации.

Все вышеописанные методы классификации направлены на поиск чисто математического сходства сигнатур без какого-либо учета их формы как таковой, которая определяется закономерностями отражения в каждом спектральном диапазоне, то есть биотическими свойствами отражающей поверхности. Кроме того, почему-то предполагается, что спектральное пространство дискретно (разделено на определенное количество отдельных областей), тогда как на самом деле, как видно, например, уже на рис. 29, оно континуально и организовано совершенно определенным образом. Это означает, что заранее невозможно выделить столько ключевых участков, сколько имеется на изучаемой территории. Исследователь, прибегающий к любому из вышеописанных методов классификации, по сути дела, действует вслепую, то есть не может оценить реальные размеры и положение определенной категории земной поверхности в спектральном гиперпространстве снимка, которое остается «черным ящиком».

Метод сегментации спектрального пространства

Необходимо принципиально иначе подойти к классификации сканерного снимка – «заглянуть» во все спектральное гиперпространство, исследовать закономерности его организации и уже целенаправленно подойти к выбору ключевых участков. Для этого в первую очередь нужно в простой и наглядной форме это гиперпространство визуализировать, причем ориентировать его таким образом, чтобы максимально выразить качественные различия между всеми представленными в нем категориями. Самый простой способ это сделать – трансформировать спектральное

3. Классификация сканерной информации

пространство, представляющее собой многомерную матрицу, с помощью стандартного для таких объектов метода – анализа главных компонент, principal component analysis (Taylor, 1977), который реализован во всех пакетах обработки сканерных данных.

Величины яркости различных каналов снимка в высокой степени взаимно коррелируют (табл. 3), и поэтому значительный процент вариации приходится на долю двух первых компонент.

Таблица 3. Типичная корреляционная матрица сканерного снимка

Каналы	G	R	NIR	SWIR1	SWIR2
G	1	0.931	0.865	0.903	0.899
R	0.931	1	0.726	0.838	0.880
NIR	0.865	0.726	1	0.868	0.762
SWIR1	0.903	0.838	0.868	1	0.965
SWIR2	0.899	0.880	0.762	0.965	1

Как показали результаты обработки методом главных компонент модельных фрагментов пятиканальных (G, R, NIR, SWIR) снимков Landsat 7 различных типов ландшафтов и различной степени антропогенной нарушенности (рис. 36), доля первой компоненты составляет, как минимум, около 60 процентов, второй – колеблется от одного до 30 процентов, но в сумме их доля в большинстве случаев близка к 100 процентам (табл. 4).

Таблица 4. Процент вариации, описываемый двумя первыми главными компонентами (PC1 и PC2) в различных типах ландшафтов

№	Типы ландшафтов	PC1	PC2	PC1+PC2
1	Низкогорный (НП «Паанаярви»)	95.01	3.71	98.72
2	Калевальский НП	94.04	4.76	98.80
3	Заповедник «Костомукшский»	97.98	1.08	99.06
4	Костомукшский промышленный узел	77.10	19.32	96.42
5	Скальное побережье Белого моря	88.40	10.24	98.64
6	Болотный массив Упяжсу	88.54	9.04	97.58
7	Лесоболотный (НП «Водлозерский»)	90.31	6.93	97.24
8	Заболоченная прибрежная низменность	59.59	33.43	93.02
9	Среднетаежные вторичные хвойно-лиственные леса	77.94	18.44	96.38
10	Агроландшафт (приладожская равнина)	84.31	13.19	97.50

Доля информации, приходящаяся на третью и последующие компоненты, меньше измерительной погрешности сканера и какого-либо смысла не имеет. Это означает, что практически с несущественными потерями информации абстрактное многомерное пространство признаков (в данном

случае спектральных яркостей по нескольким каналам) можно представить в наиболее удобном для понимания и анализа виде – в двухмерной прямоугольной системе координат, где ось X – первая компонента, а Y – вторая.

Закономерности организации спектрального пространства

При представлении объектов в осях главных компонент происходит автоматическая ординация объектов (в данном случае спектральных сигнатур) таким образом, что сходные по форме сигнатуры располагаются рядом друг с другом, а наиболее контрастные – по различным краям поля распределения, образуя проекцию спектрального гиперэллипсоида, то есть визуальный образ спектрального пространства. Суммарная величина формирующих сигнатуру значений, то есть общая яркость поверхности, возрастает слева направо, вдоль первой главной компоненты (рис. 37). Вторая главная компонента ответственна за качественные различия категорий, определяемые типами растительного покрова и минеральных земель.

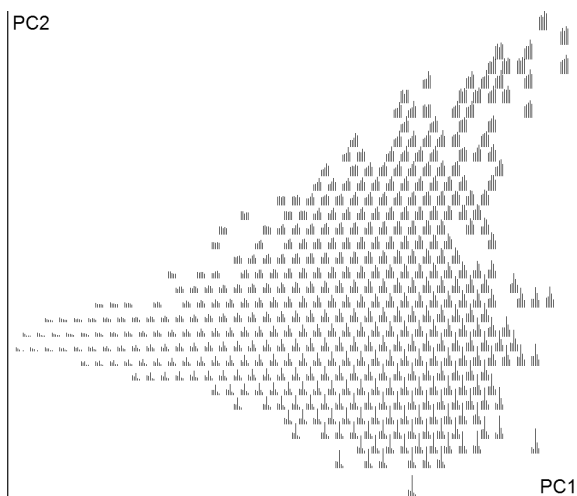


Рис. 37. Ординация сигнатур в двухмерном пространстве первых главных компонент PC1 и PC2

Конфигурация спектрального гиперэллипсоида зависит от типа сканера (прежде всего от количества каналов) и особенностей территории, однако существуют и некие общие закономерности. Наглядно продемонст-

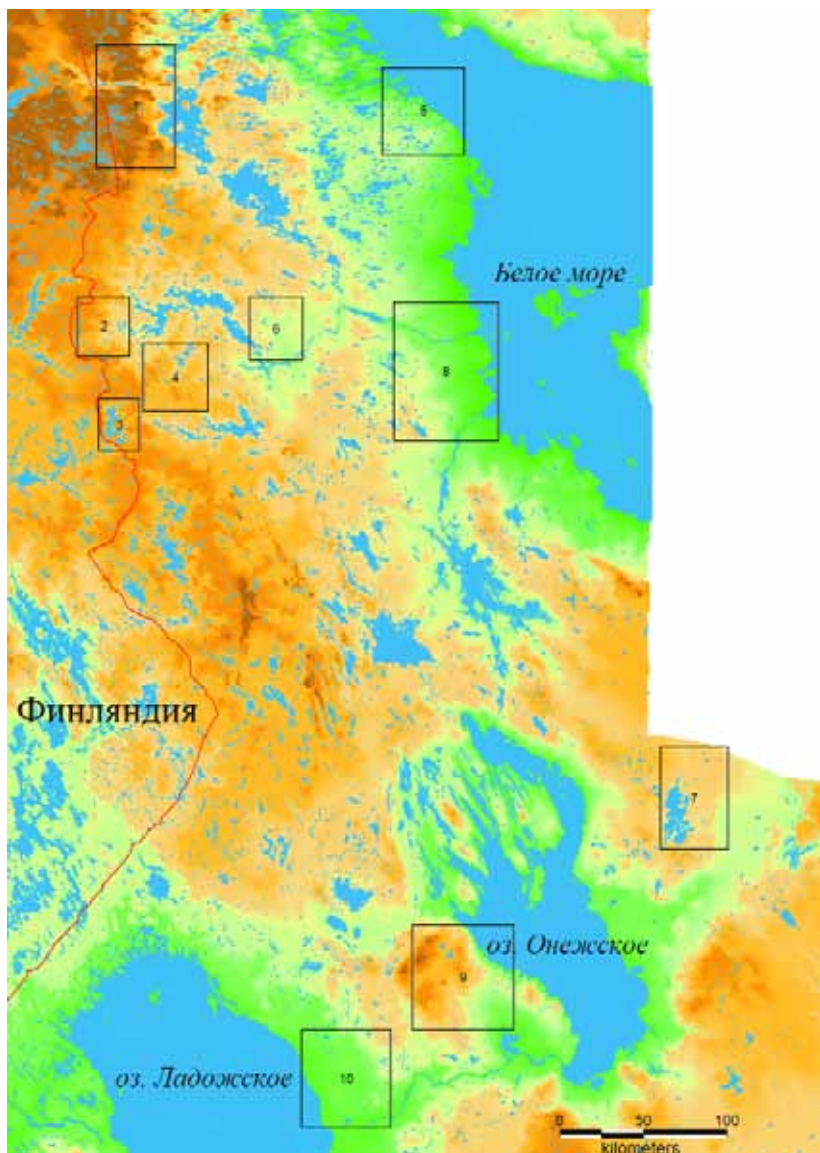


Рис. 36. Расположение модельных фрагментов сканерных снимков на территории Карелии (нумерация фрагментов согласно табл. 4)

ризовать их можно на примере гиперэллипсоида, «раскрашенного» по значению спектрального вегетационного индекса NDVI в каждой точке спектрального пространства (рис. 38). Области отрицательных значений индекса, соответствующих лишенным растительности категориям поверхности, располагаются вдоль верхней границы эллипсоида, а по направлению вниз и вправо значения индекса возрастают, индицируя увеличение фотосинтезирующей биомассы.

Классификация методами управляемой классификации происходит в два этапа: 1 – определение сигнатур ключевых участков; 2 – собственно классификация.

При использовании описываемого метода – назовем его методом *управляемой сегментации спектрального пространства* – первый этап сводится к локализации областей, занимаемой сигнатурами ключевых участков, в спектральном пространстве. Для этого предварительно создаются файлы двух первых компонент (в GRASS это осуществляется модулем *i.pca*). Файлы компонент имеют целочисленный формат, поэтому спектральное пространство состоит из ячеек размером 1 x 1, а его ширина и высота соответствуют интервалам значений компонент от минимальной до максимальной.

В этом пространстве формируется образ спектрального пространства ключевых участков в виде поля распределения (scatterplot), показывающего и области пространства, соответствующие ключевому участку, и их плотность (относительное количество пикселей в каждой ячейке пространства). Качество подобранных ключевых участков при этом легко оценивается визуально – в трехмерном представлении области правильно подобранных ключевых участков образуют объекты, напоминающие «колокол» нормального распределения (рис. 39). Нижние, пологие участки колоколов образуют области экотонов, переходных зон между категориями. Большой разброс точек свидетельствует о том, что ключевые участки в действительности представляют собой несколько различных категорий.

Образ спектрального пространства позволяет также оценить степень репрезентативности ключевых участков относительно всех категорий поверхности, представленных на снимке. Для классификации всего снимка области ключевых участков должны занимать все пространство гиперэллипсоида (показано серым на рис. 40).

Классификация осуществляется следующим образом. Спектральное пространство ключевых участков записывается в виде индексированного растрового файла, палитра которого соответствует цветам категорий.

Растр позиционирован в спектральном пространстве, его world-файл выглядит следующим образом:

1
0
0
-1
min1 (минимальное значение *PC1*)
max2 (максимальное значение *PC2*)

При классификации пиксел за пикселем из файлов компонент читаются значения *PC1* и *PC2*, и пикселу классифицированного растра назначается индекс пиксела растра спектрального пространства, позиция которого в координатах растра колонка/ряд (*col/row*) определяется значениями:

$$\begin{aligned} col &= PC1 - min1, \\ row &= PC2 - min2. \end{aligned}$$

Таким образом, растр спектрального пространства ключевых участков, если записать его в каком-либо стандартном графическом формате (*bmp*, *tif* и т.д.), может содержать как параметры классификации, так и палитру (таблицу цветов) категорий. При необходимости параметры классификации могут быть записаны также в векторной форме в виде полигонов с соответствующими значениями атрибутов (как в методе *Feature Space* пакета *Erdas*).

Процесс создания образа спектрального пространства, адекватно отражающего ландшафтную структуру, может быть достаточно трудоемким. Однако в отличие от других методов классификации этот процесс проводится не вслепую, поэтому данный метод можно назвать исследовательским, аналитическим. Он позволяет осмысленно подбирать оптимальный вариант классификации, используя известные закономерности уровней отражения сигнала в различных спектральных диапазонах. При этом возможно последовательное, пошаговое увеличение точности и детальности классификации. Например, на рис. 41 (слева вверху) приведены растр спектрального пространства третьего фрагмента (табл. 4) с областями двух наиболее распространенных категорий – вода и хвойный лес, и соответствующий результат классификации (справа вверху). Логично предположить, что промежуточная между этими категориями область спектрального пространства должна соответствовать пограничным, переходным зонам между озером и лесом. Закрасив в растре эту область спектрального пространства черным (слева внизу), в результате классифика-

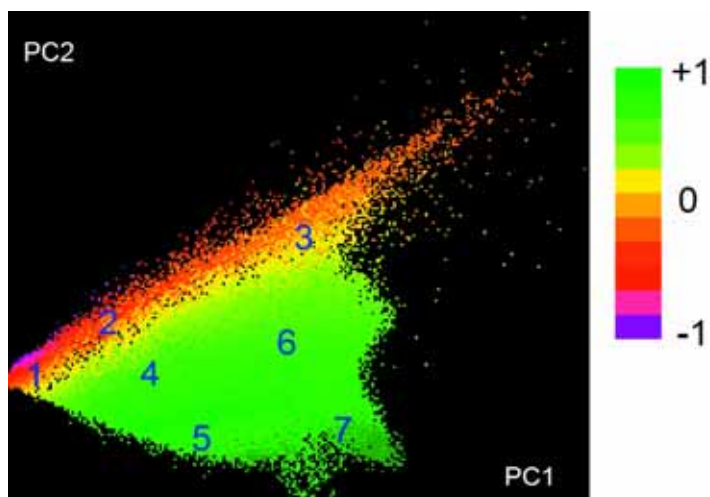


Рис. 38. Схема организации спектрального пространства

1 — вода; 2 — топи верховых болот; 3 — минеральные земли (песок, застройка и т.д.); 4 — спелые хвойные леса; 5 — вторичные хвойно-лиственные леса; 6 — травянистая и кустарниковая растительность; 7 — спелые сельхозкультуры

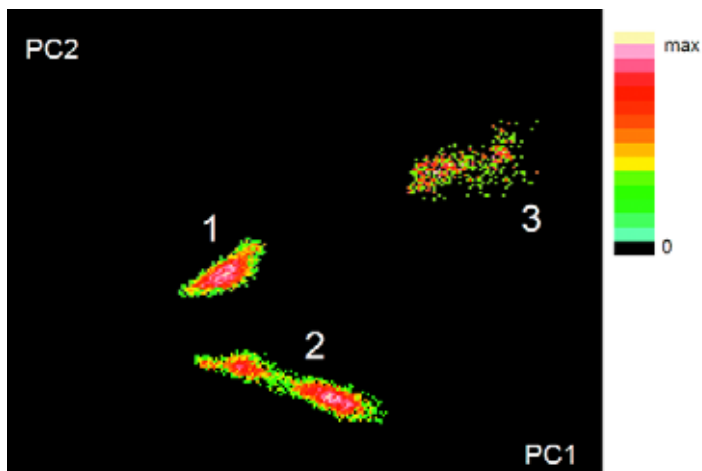


Рис. 39. Области сигнатур двух ключевых участков в спектральном пространстве главных компонент PC1 и PC2

Ключевые участки подобраны: 1 и 2 — правильно, 3 — неправильно

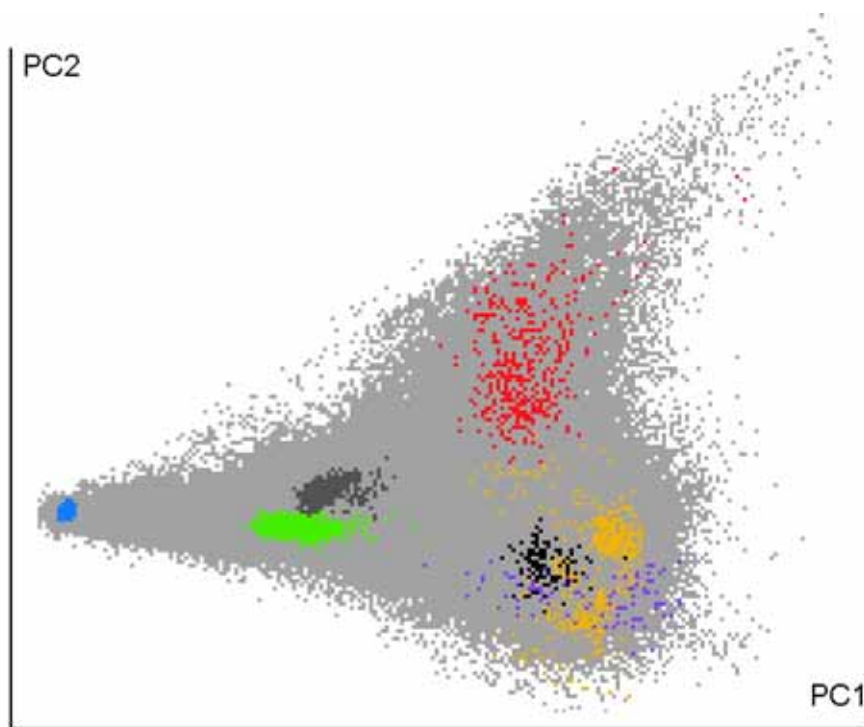


Рис. 40. Области сигнатур ключевых участков на фоне всего гиперэллипсоида снимка (показан серым цветом)

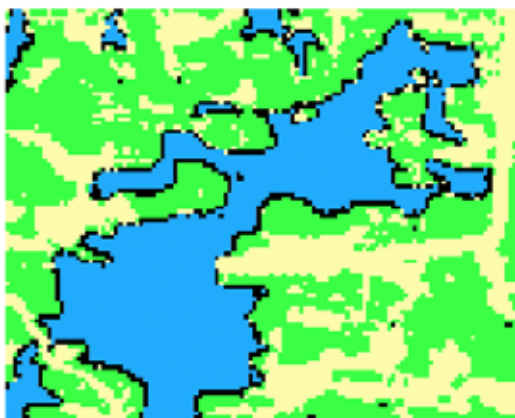
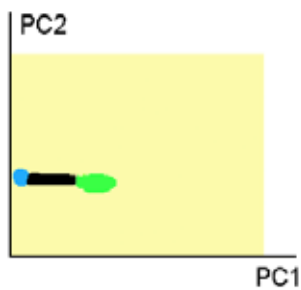
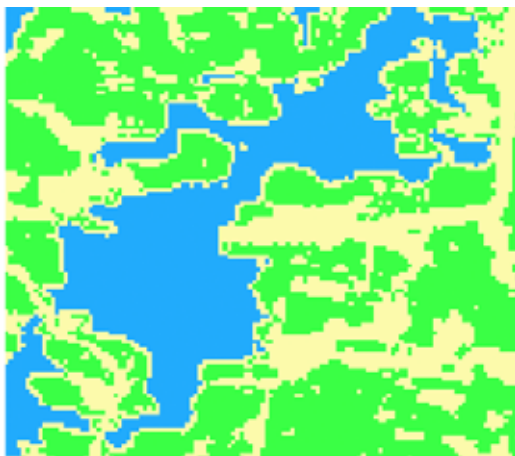
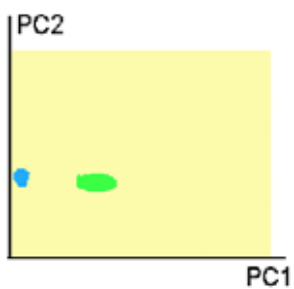


Рис. 41. Выделение переходных зон в спектральном пространстве (слева) и результаты соответствующих классификаций сканерного снимка (справа)

ции получим, как и предполагалось, береговые линии (справа внизу). Пример приведен для наглядной демонстрации простоты и эффективности метода сегментации. Получить четкую береговую линию любым другим методом управляемой классификации практически невозможно, поскольку эта категория представлена весьма различными сигнатурами. Если же прибегнуть к простейшему анализу спектрального пространства, проблема решается сама собой.

Следующее принципиальное отличие данного метода от традиционных заключается в том, что появляется возможность математического описания качественных характеристик категорий посредством локализации их положения в спектральном пространстве – например, формированием векторных полигонов, ограничивающих области категорий. Нижнюю часть гиперэллипсоида среднетаежного фрагмента 9 (табл. 4) занимает область вторичных елово-лиственных лесов, возраст которых (и соответственно доля ели в составе) увеличивается справа налево (см. рис. 39, область 2). Векторизовав эту область, как показано на врезках рис. 42, и разделив ее на две или три части (соответственно вверх и внизу рисунка), получим при классификации участки лесов, находящихся на соответствующих стадиях сукцессии (на рисунке в качестве растровой подложки – RGB-изображение, синтезированное из инфракрасных каналов, а оконтуривающие участки линии – автоматически векторизованные результаты классификации).

Положение категории в спектральном пространстве и соответственно в сукцессионном ряду в данном случае достаточно достоверно описывается линейным уравнением, а линия регрессии становится математически выраженной траекторией сукцессии в спектральном пространстве (рис. 43). Связывание траекторий сукцессий с различными наземными данными, например, моделями хода роста насаждений, дает возможность самого различного экологического и хозяйственного моделирования.

Таким образом, данный метод обеспечивает не только экстраполяцию данных ключевых участков, но и интерполяцию промежуточных значений, то есть в полном смысле этого слова *управляемую* классификацию. Классификация перестает быть однонаправленной – от ключевых участков ко всему снимку, появляется взаимосвязь между географическим и спектральным пространством, то есть возможность оп-
ределить:

– в каком месте спектрального пространства находится точка с данными географическими координатами?

– где территориально находятся объекты с данной сигнатурой?

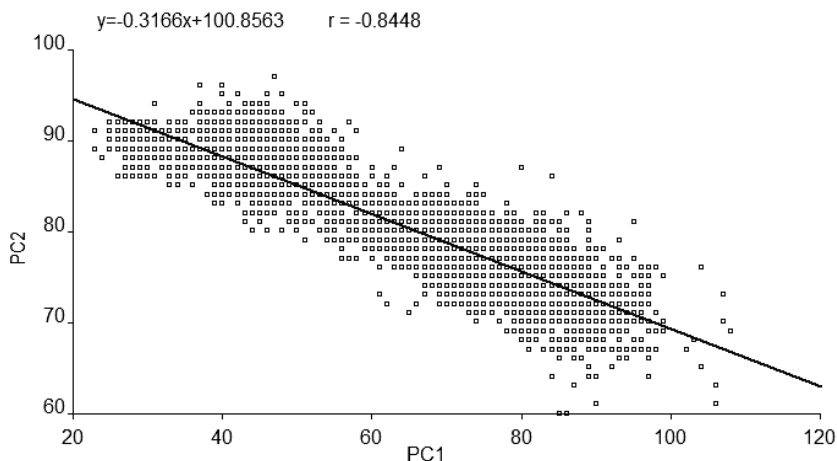


Рис. 43. Траектория вторичных слово-лиственных насаждений в спектральном пространстве

Возможность такой взаимосвязи позволяет выяснить, каких категорий ключевых участков недостаточно для достоверной классификации, и подбирать их в конкретных участках территории. В качестве вспомогательной информации для повышения точности классификации могут также использоваться аэрофотоснимки и сканерные снимки сверхвысокого разрешения. Что же касается трудоемкости процесса анализа спектрального пространства и его сегментации, нужно учитывать, что этот процесс для определенной территории осуществляется один раз. Территория эта может достигать, например, 6 500 000 га (две соседних на витке сцены Landsat). В дальнейшем будет проводиться лишь последовательное уточнение и повышение детальности классификации.

Преобразование спектрального пространства для улучшения дифференциации категорий

При анализе данных ключевых участков некоторых территорий обнаруживается, что существуют категории, области которых в спектральном пространстве взаимно перекрываются (на рис. 38 это области 6 и 7 – приблизительно левая нижняя четверть пространства). Классификация снимка только по сегменту перекрытия показывает, что эти категории находятся и на сельскохозяйственных землях (лугах), и на некоторых участ-

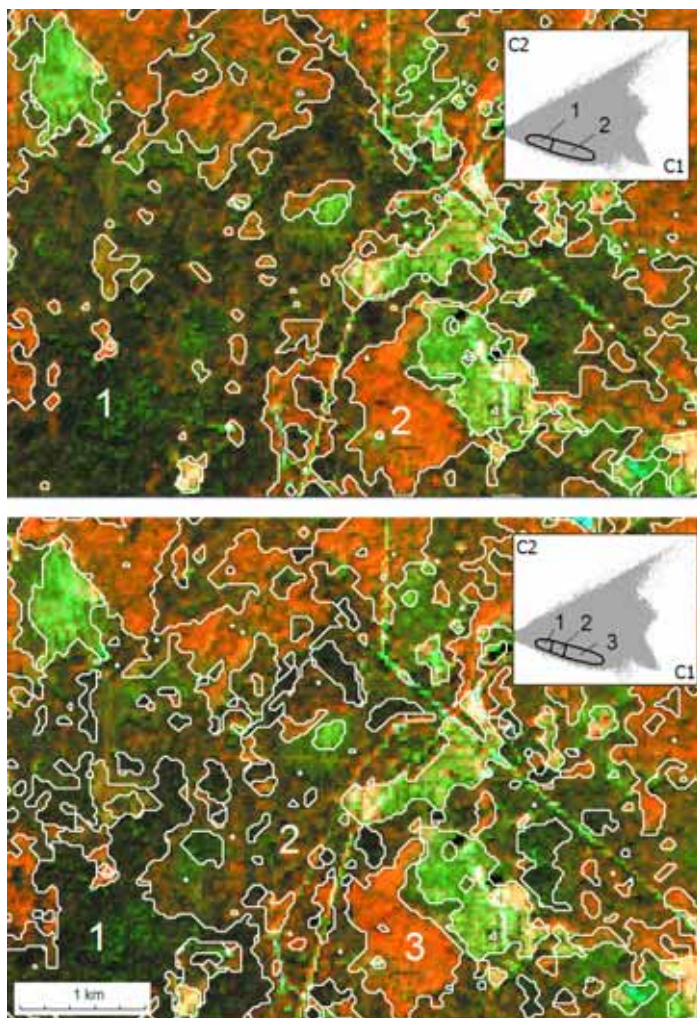


Рис. 42. Варианты классификации вторичных хвойно-лиственных лесов с различной долей хвойных в составе

На врезках — схемы сегментации спектрального пространства, серым показаны контуры гиперэллипсоида. Цифры обозначают соответствующие области в спектральном и географическом пространствах снимка. Лиственные молодняки имеют желто-оранжевую окраску, более старые — светло-зеленую, а средневозрастные и припевающие участки с выходом ели в первый ярус — темно-зеленую

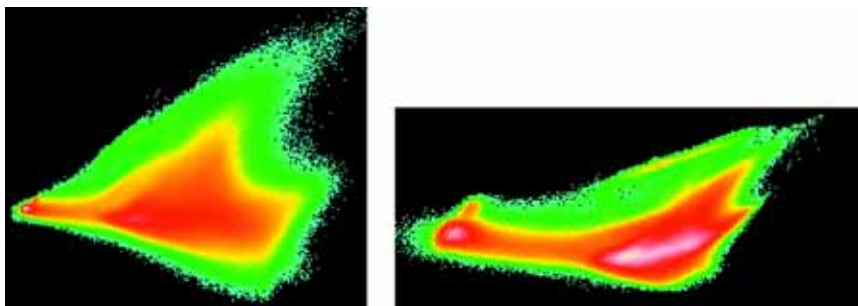


Рис. 45. Исходное (слева) и логарифмированное (справа) спектральное пространство

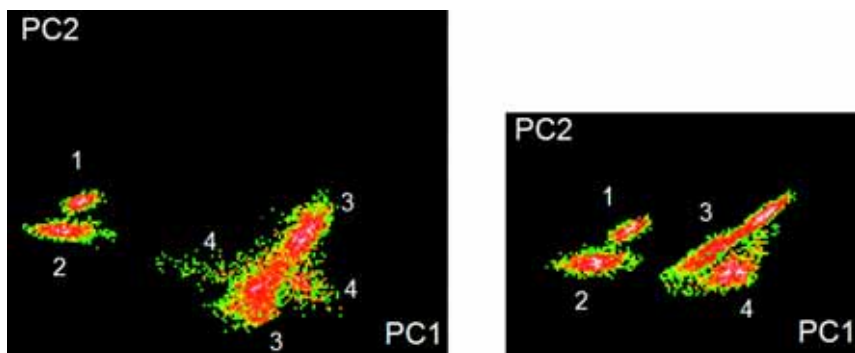
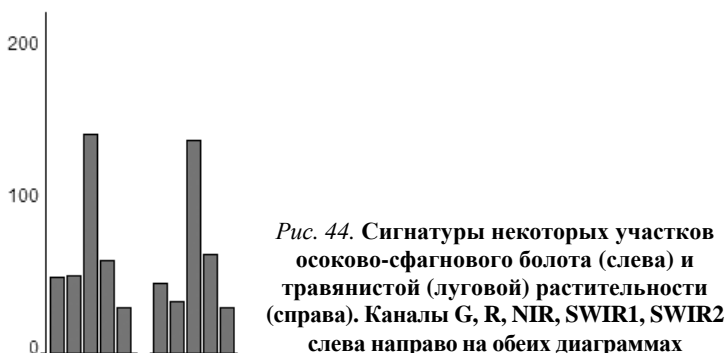


Рис. 46. Области сигнатур ключевых участков в исходном (слева) и логарифмированном (справа) спектральном пространстве

1 — сосняк зеленомошный; 2 — сосняк лишайниковый; 3 — болото; 4 — луг

ках верховых болот, причем даже на RGB-подложке цвета категорий заметно различаются. Различны и сигнатуры этих категорий, причем в наиболее существенном для растительности диапазоне – красном (рис. 44).



Причина этого явления в самом алгоритме метода анализа главных компонент и в особенности сигнатур этих категорий – экстремально высоком, по сравнению с другими диапазонами, уровне ближнего инфракрасного канала. Компонентный анализ «считает» эту особенность наиболее важной характеристикой сигнатуры, а различия в уровне красного – несущественными и помещает сигнатуры с принципиально различными биологическими характеристиками в одну область пространства.

Уменьшить влияние пикового уровня ближнего инфракрасного на положение сигнатуры в спектральном пространстве и повысить таким образом степень дифференциации категорий можно путем логарифмирования исходных значений матрицы снимка. Спектральное пространство при этом, как и следовало ожидать, в целом несколько «сжимается» в вертикальном направлении, левая его часть, наоборот, становится более объемной (рис. 45), но перекрывавшиеся в исходном пространстве категории совершенно четко отделяются друг от друга, а во взаимном расположении других сигнатур существенных изменений не происходит (рис. 46).

Траектории сигнатур в спектральном пространстве разновременных снимков

Существуют категории, области которых частично перекрываются и в спектральном пространстве предварительно логарифмированного снимка. Это также некоторые участки болот, сельхозугодий и вырубок (обычно

давностью 5 лет, свежие вырубki занимают четко обособленное от других категорий положение в гиперэллипсоиде). Но в этом случае практически одинаковы и их сигнатуры, что исключает возможность дифференциации категорий какими-либо методами математической классификации. На рис. 47 такая область представлена сегментом, обозначенным цифрой 3. В сегменте 2 находятся лишённые растительности сельхозугодья (свежевспаханые земли), в четвертом – спелые сельскохозяйственные культуры. Соответственно третий сегмент занимают участки промежуточного типа, с редкой растительностью – травянистой и кустарниковой.

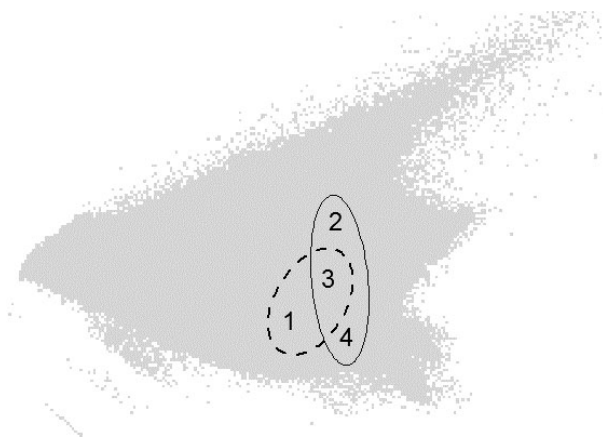


Рис. 47. Схематическое изображение сегментов категорий «болото» (пунктиром) и «сельхозугодья» (сплошная линия) в спектральном пространстве

Очевидно, в таких случаях и употребляется в некоторых публикациях упоминавшийся выше термин «перепутывание» (категорий при управляемой классификации). Нужно сказать, что с точки зрения технической системы (сканера данного спектрального и пространственного разрешения) никакого «перепутывания» в данном случае не происходит, это означает лишь, что количество и структура фотосинтезирующей биомассы и степень ровности поверхности – основные факторы, определяющие форму регистрируемой сигнатуры, – в данных категориях поверхности близки, и для каких-то задач, например, при оценке запаса фитомассы, эти категории могут совпадать. Но если, например, необходимо выяснить происхождение категории – естественное или антропогенное – это «перепутывание», безусловно, является ошибкой.

Минимизировать такие ошибки можно при исследовании данных сканерной съемки прошлых лет. Открытые (необлесенные и слабооблесенные) болота характеризуются наибольшим разнообразием спектральных характеристик по сравнению со всеми другими категориями поверхности, то есть в гиперэллипсоиде облако болот наиболее объемно, а в некоторых случаях состоит и из нескольких обособленных друг от друга фрагментов. В то же время среди всех категорий это наиболее стабильная во времени по спектральным характеристикам биотическая категория земной поверхности (естественно, если спектральные характеристики определяются в одно и то же время года).

На вырубке же в течение короткого (в масштабе продолжительности сукцессии растительного покрова) периода времени происходят значительные закономерные изменения сигнатур (рис. 48). На левой диаграмме типичная сигнатура растительности: уровень красного канала (3) значительно меньше, чем зеленого (2), за счет поглощения хлорофиллом, уровень ближнего инфракрасного (4) максимален, а уровни средневолновых инфракрасных каналов (5 и 7) плавно уменьшаются. Отметим, что указанные закономерности позволяют создать растровый слой «маски» растительности (любого типа), который может оказаться весьма полезным для увеличения достоверности результатов классификации.

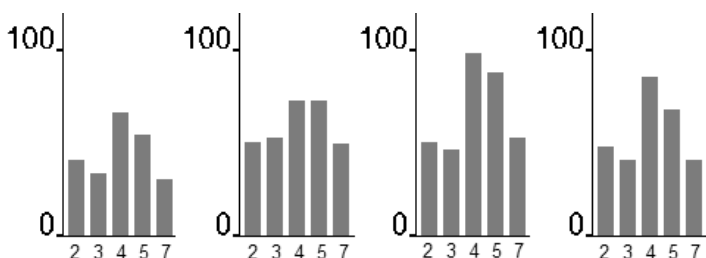


Рис. 48. Временная динамика спектральных сигнатур вырубок (по снимку Landsat 7)

Слева – спелый сосняк черничный, далее вырубки давностью соответственно 1, 9 и 15 лет. Диаграммы показывают значение байта пиксела снимка в каналах 2–5 и 7

Сразу после рубки форма сигнатуры резко изменяется. Прежде всего это выражается в том, что значение красного канала становится больше, чем зеленого, так как фотосинтезирующая биомасса в этот период практически отсутствует. Кроме того, первый средневолновый инфракрасный канал (5) становится близок по уровню ближнему инфракрасному, что также

для растительности нехарактерно. Через несколько лет с появлением растительности, пусть еще и нелесной, форма сигнатуры вырубki начинает приближаться к исходной («лесной»), но уровни всех каналов еще долгое время будут значительно больше ввиду отсутствия поглощения лесным пологом (поэтому на визуализированном снимке вырубki выглядят значительно светлее леса). Далее с течением времени яркости всех каналов уменьшаются. Эти изменения обуславливают и соответствующий «дрейф» сигнатур данных категорий в спектральном пространстве гиперэллипсоида по траектории антропогенной сукцессии лесной экосистемы – сигнатура сначала выходит за пределы «естественного» гиперэллипсоида и затем возвращается обратно, проходя при этом (на стадии «старая вырубka») область, занимаемую и некоторыми типами болот (рис. 49).

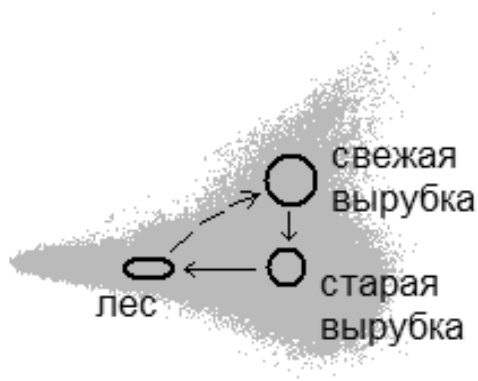


Рис. 49. Схематическое изображение траектории вырубки в спектральном пространстве

Таким образом, при определении, к какой категории нужно отнести «сомнительную вырубку», следует рассмотреть траекторию ее сигнатуры в спектральном пространстве: если на разновременных снимках не наблюдается значительных передвижений, то это болото, если же сигнатура перемещается согласно рис. 49, то данный участок является вырубкой. Аналогично в случае «перепутывания» болот и земель, находящихся в сельскохозяйственном обороте, последние в отличие от болот будут перемещаться из второго сегмента в четвертый (см. рис. 47).

Следует отметить, что сканер Landsat 5 (отличающийся от Landsat 7 лишь отсутствием ненужного для классификации панхроматического канала) функционирует с 1984 г. до настоящего времени. Как показывает опыт Финляндии, где на данных Landsat 5 основана государственная система учета лесного фонда, безоблачные сцены для любого участка могут быть получены с интервалом не более 3 лет (Tomppo, 1990).

Таким образом, при наличии всех снимков Landsat 5 и Landsat 7 задача точного определения данных категорий была бы практически решена без использования дополнительных методов или данных. Кроме того, ретроспективная экстраполяция данных съемки позволила бы в значительной степени восстановить структуру лесного покрова, существовавшую в начале 1960-х гг., когда значительная часть территории Карелии еще не была затронута масштабными рубками.

При классификации сканерной информации необходимо в первую очередь учитывать технические возможности сканера, а не пытаться «насиленно» получить результат, желательный по экологическим или хозяйственным критериям. Например, «болото», «луг», «пашня», «зарастающая вырубка» – категории экологические и хозяйственные, условно назовем их «ландшафтные». Попытка положить их в основу классификации неизбежно приведет к «перепутыванию» категорий при любом методе классификации. Но метод сегментации спектрального пространства позволяет определить степень и характер соответствия «ландшафтных» категорий растительного покрова «спектральным», то есть тем, которые различаются по положению сегментов их сигнатур в спектральном пространстве.

Иногда спектральные категории четко соответствуют ландшафтным, как в случае производных хвойно-лиственных лесов (см. рис. 42), иногда такое соответствие менее выражено или полностью отсутствует. В этом случае перевод спектральных категорий в ландшафтные должен производиться другими методами – путем отслеживания траекторий на разновременных снимках, исследования текстуры снимка, привлечения информации о рельефе, данных других систем дистанционного зондирования – радаров и лидаров.

Анализ текстуры

При отсутствии разновременных данных, если для исследуемой территории имеется лишь один сканерный снимок, дополнительную информацию может дать анализ его текстуры. Нужно отметить, что текстура – второй важнейший массив качественной информации (после спектральной), содержащийся в сканерных снимках, и его использование может повышать достоверность спектральной классификации.

Так, например, в большинстве случаев необлесенное болото обладает более «гладкой» поверхностью, чем вырубка. Следы техники и

порубочные остатки создают достаточно хаотическую картину во всех спектральных диапазонах. Под гладкостью здесь понимается не только физическая гладкость, ровность поверхности (хотя она тоже имеет значение, так как сильно влияет на отражательные свойства), а различия в спектральных характеристиках между соседними пикселями снимка, которые и определяют его текстуру.

Характеристикой спектральной «гладкости» поверхности могут служить различные индексы, используемые в ландшафтной экологии для выявления закономерностей пространственной организации растительного покрова: индекс фрагментации (Monmonier, 1974), индексы разнообразия (*diversity*), относительного обилия (*relative richness*) и доминирования (*dominance*) (Turner, 1989), NDC (*number of different classes*), CVN (*center versus neighbor*), BCM (*binary comparison matrix*) (Murphy, 1985), повторяемости классов (*class frequency*). Все они тем или иным способом оценивают степень разнообразия значений в скользящем окне 3х3 пиксела для одного из каналов сканера или классифицированного снимка. Существуют также показатели для оценки параметров текстуры для нескольких каналов одновременно, например, среднего эвклидова расстояния, вариации, асимметрии («*skewness*») (Haralic, 1977; Irons & Petersen, 1981).

Целесообразно проводить расчет индексов для ближнего инфракрасного канала, в котором содержится наибольшее количество информации о характеристиках растительного покрова. Могут быть использованы простейшие индексы NDC (количество различных значений в окне) и фрагментации (относительное количество различных значений в окне). Очевидно, что чем меньше значения этих индексов, тем ровнее поверхность.

Можно также рассматривать отдельный канал снимка (в данном случае ближний инфракрасный) как цифровую модель высот – высотой служит яркость пиксела, а ровность определяется величиной уклона. Однако наилучшие результаты дает применение в качестве критерия ровности величины фрактальной размерности (*fractional dimension*) (Eastman, 1985). Оказалось, что для поверхности болот, сходных по сигнатуре с зарастающими вырубками, ее величина не превышает 2.0001–2.00015 (рис. 50). Таким образом, при исключении из объектов участков с данной величиной фрактальной размерности, классифицированных как «вырубка», достоверность результатов значительно увеличивается.

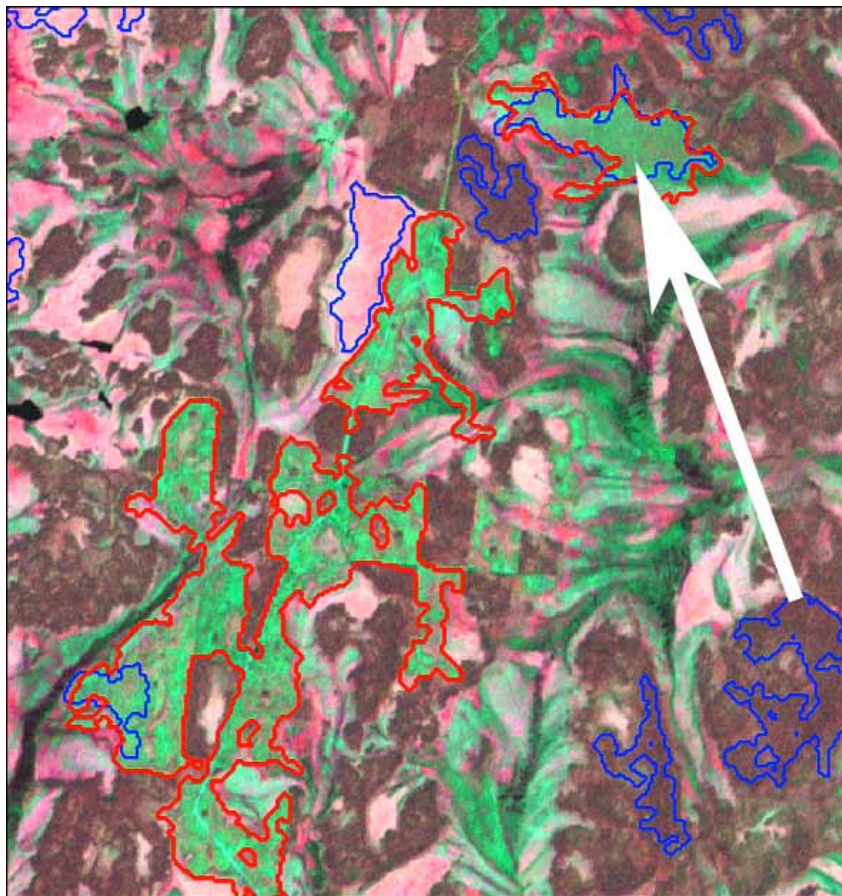


Рис. 50. Использование фрактальной размерности для коррекции результатов классификации по спектральным сигнатурам

На фоне визуализированного из инфракрасных каналов изображения красным цветом показаны контуры категорий, классифицированных как «вырубка», синим — контуры с фрактальной размерностью меньше 2.0001. Указанный стрелкой объект (и визуально более «гладкий», чем вырубка), таким образом, является болотом, а не вырубкой

4. РЕЛЬЕФ В ГИС

Формирование цифровых моделей высот

Цифровая модель высот (DEM) может формироваться с использованием информации всех трех классов систем дистанционного зондирования – сканеров, радаров, лидаров.

Современные технологии конвергентных съемок сверхвысокого разрешения, выполняемых оптико-электронными сканерами с длиннофокусными зеркальными объективами, позволяют получать DEM с точностью до одного метра по высоте, то есть значительно более высокой, чем в традиционной аэрофототопографии (Книжников, Кравцова, 2003).

При радарной (радиоинтерферометрической) съемке высоты определяются по разности фаз сигналов, принимаемых двумя разнесенными в пространстве антеннами, теоретически точность DEM достигает долей длины волны сигнала, то есть нескольких сантиметров, что значительно превышает потребности ландшафтной экологии. Такую же точность обеспечивает лазерная локация (Данилин и др., 2005).

Однако цифровые модели высот, полученные дистанционными методами, до настоящего времени остаются малодоступными для широкого круга исследователей ввиду их высокой стоимости, а в России – еще и ввиду секретности некоторых из этих данных. В 2000 г. проведена радиоинтерферометрическая съемка с шаттла Endeavor, в результате которой была получена глобальная цифровая модель высот с детальностью топокарты масштаба 1:50 000, однако территория съемки ограничена 60 градусами северной широты, поэтому большая часть таежной зоны России осталась неохваченной.

По этим причинам, очевидно, еще в течение некоторого периода единственным источником получения DEM для широкого круга специалистов будут цифровые топокарты, точнее, векторизованные горизонтали (изолинии высот) этих карт. Формирование раstra DEM производится путем интерполяции значений высот узлов изолиний в регулярную решетку с заданным шагом (разрешением раstra).

Для этого используется несколько методов: IDW (средневзвешенные по расстоянию значения), TIN – триангуляция Делоне, кригинг, регуляризованные сплайны. Методы IDW и TIN дают удовлетворительные результаты лишь в том случае, если узлы изолиний расположены равномерно по площади, чего практически никогда не бывает – плотность точек вдоль линии в большинстве случаев больше, чем между соседними горизонталями. Метод кригинга часто дает естественно выглядящие артефакты (Гофаров, 2004).

Наилучшие результаты обеспечивает метод регуляризованных сплайнов с натяжением (*regularized spline with tension*), реализованный в модуле *v.surf.rst*.

Интерполяция этим методом производится по значениям высот упругой «пленки», облегающей изолинии, расположенных на соответствующих высотах в пространстве (рис. 51, вверху), причем степень упругости и точность прилегания пленки к горизонталям можно регулировать. Артефакты при этом методе могут возникать лишь при очень резких перепадах высот на небольшом пространстве, но и они практически исчезают при установке максимального натяжения (*tension*).

Геоморфометрический анализ

Простейшие количественные характеристики рельефа, которые могут быть получены из модели высот – это уклон (*slope*) и экспозиция склона (*aspect*). Их величины рассчитываются методом скользящего окна 3 x 3 по значениям отметок высот соседних пикселей (рис. 51, в центре и внизу). Функции для вычисления уклона и экспозиции включены во все растровые ГИС, в GRASS они реализованы в модуле *r.slope.aspect*.

Уже эти параметры несут важную ландшафтно-экологическую информацию, поскольку их величины определяют режим свето-, тепло- и влагообеспеченности местообитаний. Привлечение карт экспозиции и уклона позволяет повысить детальность спектральной классификации в тех случаях, когда незначительные различия эдафических условий местообитаний не отражаются на сигнатуре и не детектируются сканером. Например, сегменты сигнатур сосняков лишайниковых на флювиогляционной равнине и сосняков скальных практически совпадают, но средний уклон поверхности мест их произрастания резко различен, что дает возможность детализировать результаты классификации, полученной лишь на основе спектральных характеристик.

При дифференциации схожих по сигнатурам участков болот и вырубок может использоваться мера ровности поверхности – уже не спектральной, как в приведенном выше примере с фрактальной размерностью ближнего инфракрасного канала, а физической, но для этого необходимо наличие DEM с детальностью, соответствующей разрешению сканера, то есть, как минимум, масштаба 1:50 000.

Более сложные и детальные методы геоморфологического анализа с использованием цифровой модели высот (геоморфометрии) изложены в диссертации J.Wood'a (1996) – одного из разработчиков GRASS. Многие

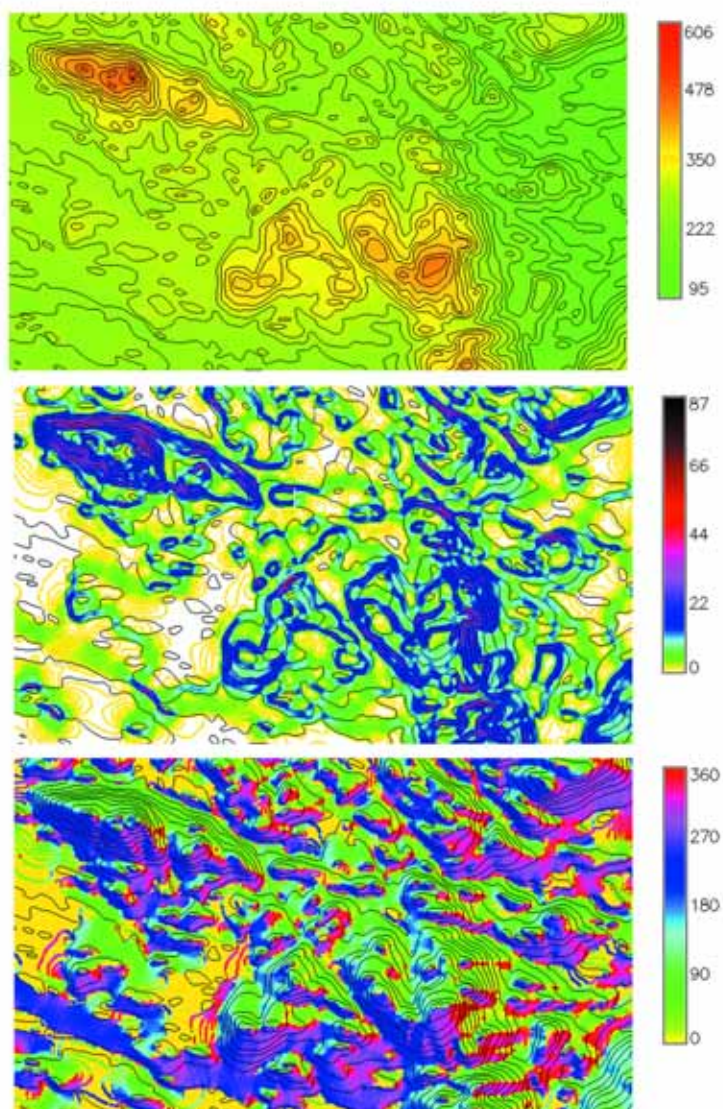


Рис. 51. Сверху вниз, для одного и того же участка низкорного ландшафта:

Вверху – DEM, интерполированная из векторных горизонталей топокарты (высота в метрах);
 в центре – уклон (в процентах); внизу – экспозиция склона (азимут)

параметры анализа включены в модуль *r.param.scale*. Наиболее практически значимый из них – форма рельефа, которая может быть рассчитана для любого размера скользящего окна, то есть с различной степенью генерализации. Всего выделяется шесть форм рельефа (рис. 52).

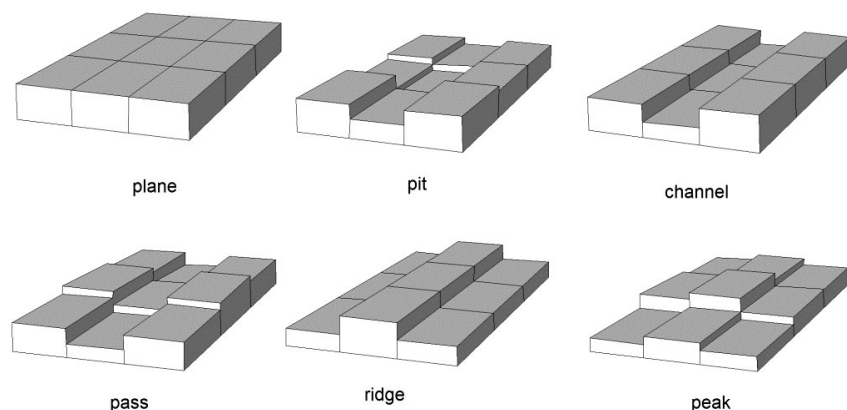


Рис. 52. Основные геоморфометрические формы рельефа

Номера соответствуют номерам категорий раstra, получаемого в результате работы модуля *r.param.scale*

- 1 – plane – плоскость; 2 – pit – впадина; 3 – channel – ложбина, водоток; 4 – pass – перевал, седловина (вогнутый элемент рельефа); 5 – ridge – гребень (выпуклый элемент рельефа); 6 – peak – вершина

Фрагмент карты форм рельефа приведен на рис. 53. Как видим, эти формы рассчитываются без учета уклона, поэтому комплексная характеристика рельефа может быть получена лишь путем наложения нескольких растров – уклона, аспекта, форм и при необходимости других, полученных с использованием модулей *r.slope.aspect*, *r.param.scale*, *r.buffer*, *r.texture*. Например, подножия склонов – это ложбины (форма 3) с нулевым или малым значением уклона.

Прочие применения DEM

Цифровая модель высот позволяет моделировать условия освещенности (угол падения солнечных лучей) любой точки поверхности в заданную дату и время суток и соответственно количество приходящей

Трехмерное моделирование структуры и динамики таежных ландшафтов

солнечной радиации, что дает возможность делать расчеты водного и теплового баланса (модуль *r.sun*). Модуль *r.sunmask* определяет области затенения при заданном положении Солнца.

Профиль местности по заданной векторной линии рассчитывается с помощью модуля *r.profile*. Для гидрологических расчетов предназначен целый ряд модулей, например, границы водосборов дает *r.watershed* (рис. 54).

Трехмерная визуализация

На основе DEM можно формировать трехмерные композиции, помещая двухмерные растровые или векторные карты на цифровую модель рельефа (рис. 56, 58). В состав пакета GRASS входит мощный модуль трехмерной визуализации NVIZ, позволяющий создавать композиции с любыми параметрами направления и угла визирования и освещения (сезона и времени суток). Последовательность таких композиций, построенная в определенном порядке, дает возможность виртуального полета над территорией по заданному маршруту и в заданное время.

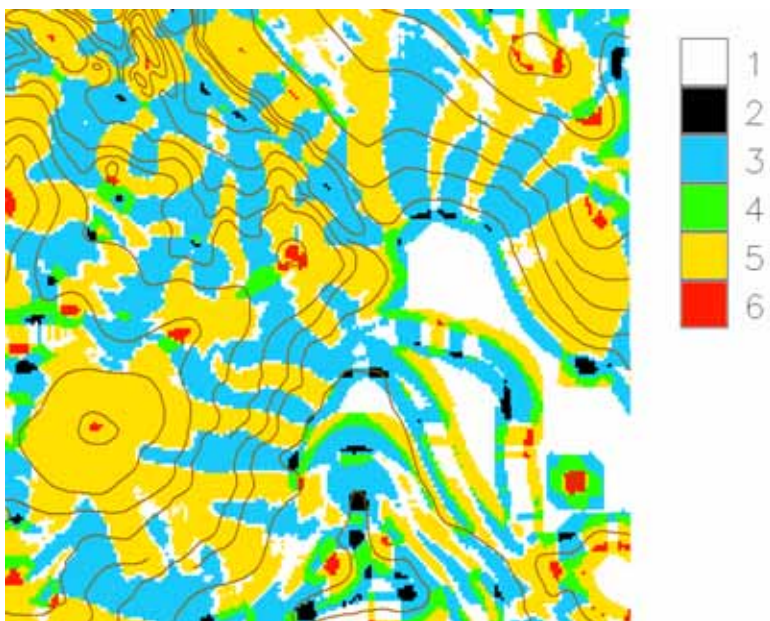


Рис. 53. Формы рельефа на фоне горизонталей, из которых была интерполирована DEM

Нумерация соответствует приведенной в подписи к рис. 52

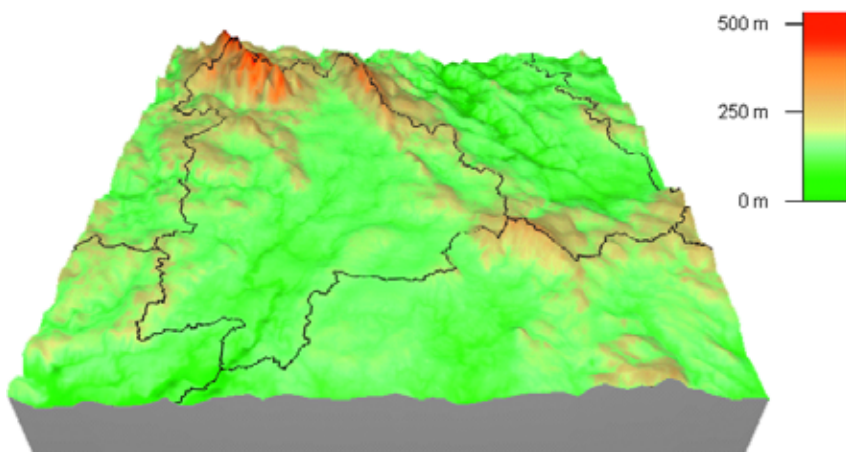


Рис. 54. Моделирование структуры водосборов по DEM

5. ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ЛАНДШАФТОВ

Ландшафтное картографирование на основе ГИС-технологий и данных ДЗ

В результате многолетних исследований в Институте леса КарНЦ РАН разработана региональная классификация типов ландшафтов, в основу которой положены три фактора среды:

- 1) генетические типы рельефа и четвертичных отложений – 6 типов и 4 подтипа;
- 2) степень заболоченности территории – низкая (<20%), средняя (20–50%), высокая (>50%);
- 3) преобладающий тип коренных лесных местообитаний – сосновый или еловый.

Соответствующая этой классификации ландшафтная карта создавалась в 1980-е гг. путем совмещения бумажных карт Карелии масштабов 1:500 000 – 1:1 000 000: геоморфологической, четвертичных отложений, торфяного фонда, карты лесов по состоянию на 1958 г. Ввиду разномасштабности, различий используемых проекций и методик составления исходных карт точность выделения ландшафтных контуров на этой ландшафтной карте совершенно недостаточна ни для практического, ни для научного применения, по сути дела, это карта-схема.

Работы по ландшафтному картографированию на базе ГИС-технологий и данных ДЗ начались с создания на основе этой карты-схемы геометрически корректной цифровой карты типов ландшафтов. При этом использовались следующие исходные данные:

- сканерные снимки высокого разрешения (Landsat TM/ETM+, Spot, IRS);
- цифровые модели высот;
- векторные данные ключевых участков (ландшафтных профилей и пробных площадей);
- растровая карта лесов 1958 г. М 1:600 000;
- растровая карта четвертичных отложений М 1:1 000 000.

Карта торфяного фонда не использовалась, поскольку степень заболоченности со значительно более высокой точностью определялась путем классификации сканерных снимков.

В качестве цифровых моделей высот использовалось покрытие Global DEM (<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/gtopo30.html>) полуминутного разрешения (около 1 км), а также (для некоторых участков

территории) модели высот, интерполированные из векторных горизонталей топокарты масштаба 1:200 000. Все данные были приведены к единой картографической проекции (UTM 36-я зона, эллипсоид WGS84).

Локализация ландшафтных профилей проводилась с использованием трансформированных в рабочую проекцию соответствующих фрагментов растровых топокарт масштаба 1:50 000 – 1:100 000, планов лесонасаждений (поскольку ландшафтные профили в большинстве случаев закладывались по квартальным просекам) и растровых подложек с разрешением 15 м, синтезированных путем RGB-HLS-RGB преобразования из 4, 5, 7 и 8 каналов Landsat 7. Данные маршрутных ключевых участков вводились непосредственно по определенным прибором GPS координатам и при необходимости корректировались по растровой подложке (рис. 55). Полигоны ключевых участков создавались путем ручной векторизации по растровой подложке, затем к геоданным подключалась атрибутивная информация – категория земель, тип леса или вырубки, возраст и т.д.

При проведении границ ландшафтных контуров использовался весь комплекс описанных выше методов автоматической обработки сканерных снимков и цифровых моделей высот, лишь в отдельных случаях, когда имеющейся информации было недостаточно, границы контуров были оставлены в таком виде, как на карте-схеме.

При выделении сельговых типов ландшафтов использовалось значение абсолютной высоты над уровнем моря, а также величина уклона поверхности. Граница между равнинными и холмисто-грядовыми ландшафтами также определялась по средней величине уклона поверхности. Степень заболоченности определялась на классифицированных по этому параметру сканерных снимках. На рис. 56 показана трехмерная модель ландшафтной структуры с несколькими контрастными типами ландшафта.

Скальные типы ландшафтов четко идентифицировались по обособленной от других лесных категорий сигнатуре преобладающих в этом типе сосняков скальных.

Наибольшие расхождения с картой-схемой возникли при определении преобладающих типов лесных местообитаний на сканерных снимках. Очевидно, что одной из причин этих расхождений являются не только ограниченные возможности сканерной информации, но и различные критерии отнесения лесов к «соснякам» или «ельникам» при классификации сканерных снимков и при лесоустройстве. Разрешение

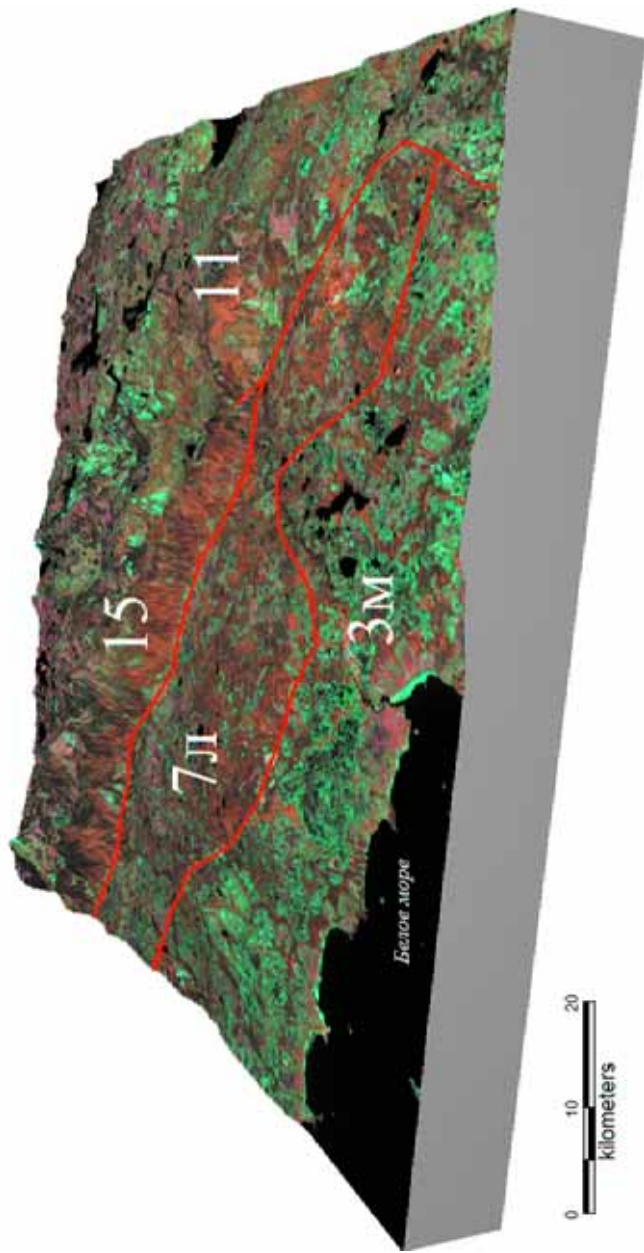


Рис. 56. Трехмерная модель ландшафтной структуры на уровне типов ландшафта

3м — сильнозаболоченная морская равнина с преобладанием сосновых местообитаний, 7л — среднезаболоченный холмисто-рядовый с преобладанием сосновых местообитаний, 11 — среднезаболоченный ледниково-аккумулятивный с преобладанием сосновых местообитаний, 15 — селгтовый с преобладанием еловых местообитаний

этого вопроса относится к перспективным направлениям ландшафтных исследований.

Карта уточненных границ ландшафтных контуров стала основой электронного атласа ландшафтов Карелии, разработка которого была начата в 2002 г. (*грант РФФИ 02-07-97502p2002север_в*). Атлас представляет собой векторную карту типов ландшафтов (рис. 57), интегрированную с различными качественными и количественными характеристиками каждого типа ландшафта по экологическим, ресурсным и хозяйственным критериям и позволяет получать набор соответствующих тематических карт районирования территории.

В электронном атласе собственно тип ландшафта характеризуется тремя показателями, выражаемыми буквенными и цифровыми индексами:

а) генетические типы рельефа и четвертичных отложений – 6 типов и 4 подтипа:

- 1 – озерные, озерно-ледниковые и морские(1а) равнины;
- 2 – ледниковые и водно-ледниковые (2а) холмисто-грядовые;
- 3 – ледниково-аккумулятивные сложного рельефа;
- 4 – денудационно-тектонические холмисто-грядовые с комплексами ледниковых образований(4а) и низкогорьями(4б);
- 5 – денудационно-тектонические грядовые (сельговые);
- 6 – скальные;

б) степень заболоченности территории – низкая (L), средняя (M), высокая (H);

в) преобладающий тип местообитаний – сосновый (P) или еловый (S).

Таким образом, совокупный индекс, полученный конкатенацией трех указанных индексов, полностью отражает название типа ландшафта: например 5LS – ландшафт сельговый слабозаболоченный с преобладанием еловых местообитаний.

В атлас включена следующая атрибутивная информация:

1. Преобладающие типы леса.
2. Производительность и потенциальная продуктивность лесов.
3. Интенсивность возобновления ели под пологом сосновых и лиственных лесов.
4. Тенденции и особенности естественного лесовозобновительного процесса на вырубках и способы восстановления лесов.
5. Пирогенная уязвимость.
6. Лесорастительные условия.
7. Рекреационные качества.
- 8–13. Биологические запасы:

- ягод черники;
- листа черники;
- ягод брусники;
- побегов брусники;
- побегов багульника;
- лишайников.

14. Экологическая целесообразность ведения сплошных рубок главного пользования.

15. Приоритетное направление лесопользования (целевое назначение лесов).

16. Уязвимость лесов к антропогенным воздействиям.

17. Запасы торфа (общий и открытых болот).

18–20. Плотность населения лося, глухаря и тетерева.

Структура базы данных атласа не является конечной, по мере продолжения ландшафтных исследований она будет дополняться, конкретизироваться и корректироваться.

Картирование структуры на субландшафтном уровне

Принцип выделения типов ландшафтов путем наложения растров модели высот и классифицированных по степени заболоченности и типам растительности сканерных снимков, применявшийся в процессе создания карты типов ландшафта, использовался и при пространственной детализации контуров на субландшафтном уровне (местности и урочища).

На рис. 58 показан фрагмент наиболее широко распространенного в Карелии типа ландшафта денудационно-тектонического холмисто-грядового с комплексами ледниковых образований среднезаболоченного с преобладанием сосновых местообитаний. На данном участке (Костомукшский заповедник) наличествует три типа местностей, все с преобладанием сосновых местообитаний:

- 1 – среднезаболоченные грядообразные возвышенности;
- 2 – сильнозаболоченные равнинные депрессии;
- 3 – слабозаболоченные всхолмления водно-ледникового происхождения.

Для выделения типов местности необходима модель высот с детализацией, соответствующей масштабу карты не менее 1:200 000. Местности первого типа (куполообразные возвышенности) оконтуривались по абсолютным отметкам модели высот и величине уклона поверхности. В масштабе 1:200 000 небольшие всхолмления местности 3 не проявляются,

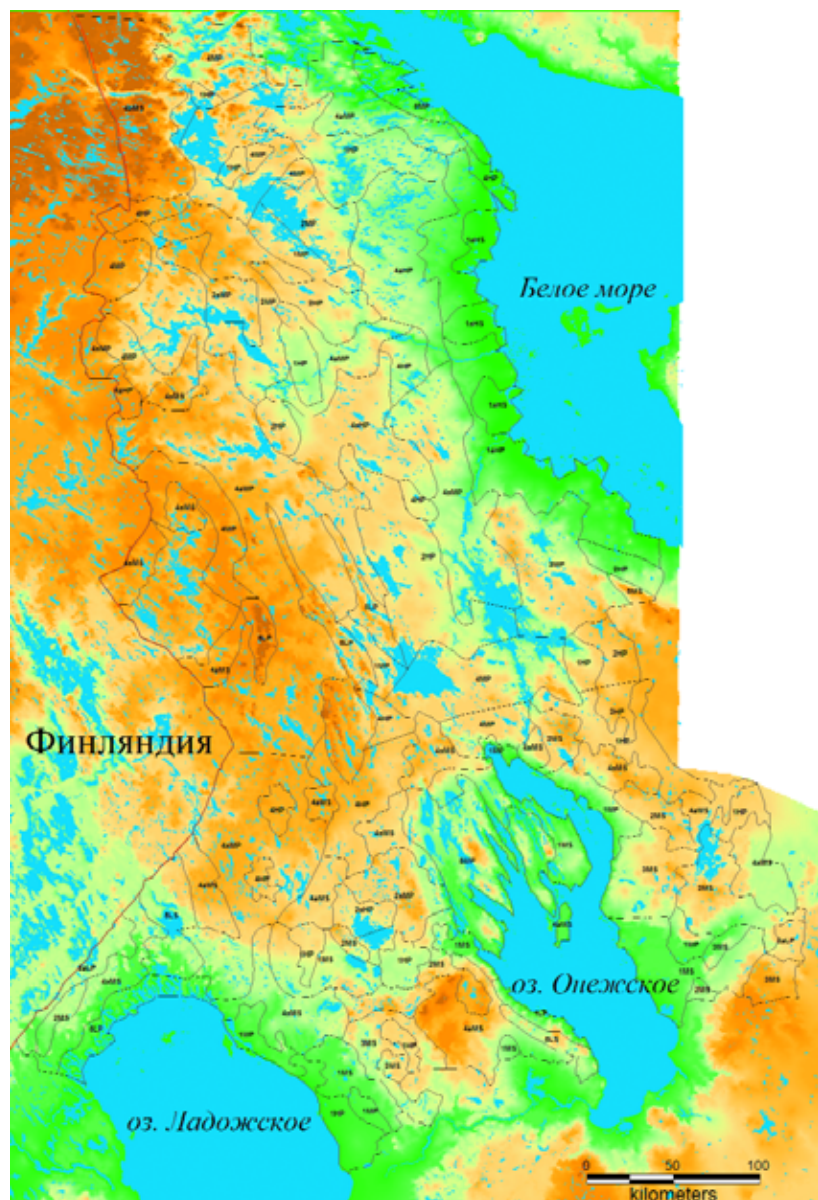


Рис. 57. Карта типов ландшафтов Карелии

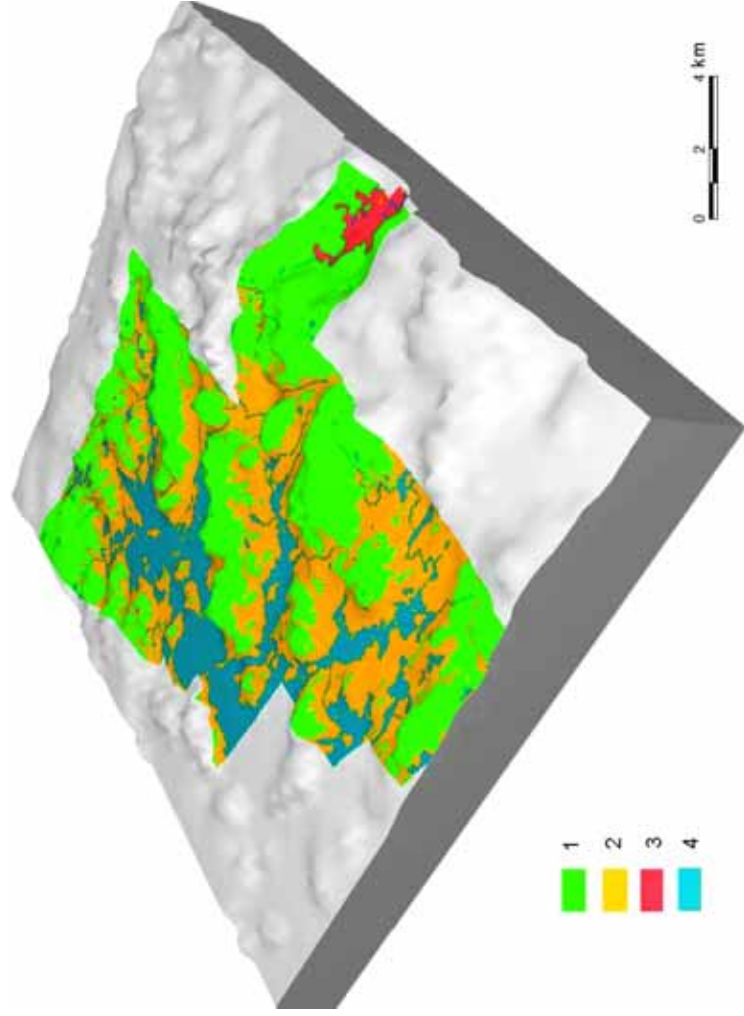


Рис. 58. Трехмерная модель ландшафтной структуры на уровне местности

1 – средневозвышенные грядовообразные возвышенности; 2 – сильновозвышенные равнинные депрессии; 3 – слабозаволоченные всхолмления водно-ледникового происхождения; 4 – озеро

поэтому разделение равнинных местностей 2 и 3 проводилось по классифицированным снимкам Landsat 7, на которых четко выделяются местобитания с недостаточным увлажнением – сосняки скальные и лишайниковые.

Для выявления структуры *на уровне урочища* детализации модели высот, полученной из карты масштаба 1:200 000, уже недостаточно, необходимо, как минимум, масштаб 1:50 000. Классификация снимка Landsat 7 по данным ландшафтных профилей также не обеспечивает выделения всех типов формирующих урочища биотенозов, достоверно различаются лишь сосняки, ельники и открытые болота рис. 59. Анализ спектрального пространства показывает, что в принципе возможна дальнейшая детализация по типам леса, однако для этого необходимы дополнительные наземные данные с точностью их локализации на местности на уровне крупных парцелл (био групп деревьев) с размером, соответствующим размеру пиксела (30 м). Перспективным в этом направлении представляется вовлечение в классификацию, помимо основных каналов, спектрального индекса стресса влажности MSI.

В любом случае при наличии модели высот соответствующей детализации, разделение даже близких или одинаковых по спектральным характеристикам типов леса могло бы осуществляться по их положению в рельефе, определяющему режим увлажнения. Так, черничные и брусничные типы обычно приурочены к вершинам и склонам, сфагновые – к их подножиям и плоским понижениям.

Мониторинг естественных и антропогенных нарушений растительного покрова

Выявление вырубок, ветровалов, гарей

Обнаружение естественных и антропогенных нарушений, приводящих к полному уничтожению растительного покрова, – одна из наиболее просто решаемых с помощью сканерной информации задач, поскольку такие нарушения приводят к резкому изменению формы сигнатуры данного участка поверхности и соответственно к изменению положения сигнатуры в спектральном пространстве. Однако при этом в большинстве случаев они оказываются в областях других категорий – и естественных, и антропогенных. Поэтому для максимально точного автоматического выделения таких поврежденных участков, например, ветровала на рис. 60, желательно иметь снимки прошлых лет, на которых проводится классификация всего по двум категориям – «лес» и

«все остальное». Таким образом, если в растре В (последняя по времени съемка) категория 1= «ветровал», а в растре А (съемка прошлых лет) категория 1 = «лес», итоговая карта получается в результате логической операции ($A=1 \text{ and } B=1$).

На рис. 61 показаны результаты аналогичной обработки снимков с целью мониторинга вырубок и оценки естественного возобновления лесов в окрестностях Костомукшского ГОКа и г. Костомукши.

Разработка карты антропогенной трансформации ландшафтов

Наиболее масштабное исследование антропогенной трансформации биосферы в таежной зоне – составление Атласа малонарушенных лесных территорий России (Аксенов и др., 2003). Не умаляя важности и нужности этой работы, отметим, что выделение малонарушенных лесных массивов – это лишь первая инвентаризационная стадия организации экологически сбалансированного природопользования (ландшафтно-экологического планирования). Необходимо иметь актуальные объективные данные о тенденциях естественных и антропогенных сукцессий не только в массивах малонарушенных лесов, но и на окружающей их территории, в целом о ресурсном потенциале природно-территориальных комплексов.

Получить их возможно лишь при организации постоянного мониторинга на основе современных научных знаний о принципах организации и функционирования природных систем.

Комплексное изучение антропогенной трансформации ландшафтов Карелии дистанционными методами начато в 2005 г. На первом этапе в качестве модельных были выбраны две территории в северо- и средне-таежной подзонах (рис. 62), в окрестностях заповедников «Костомукшский» (А) и «Кивач» (Б). Таким образом, были включены участки в практически естественном состоянии и в различной степени антропогенной трансформации. Большая часть модельных территорий находится в пределах одного типа ландшафта. В качестве ключевых участков использовались ландшафтные профили, заложенные в пределах модельных фрагментов (четыре во фрагменте А и два во фрагменте Б). Использовались также данные точечных ключевых участков (различных производных лесов и сельскохозяйственных земель в среднетаежной подзоне), характеристики которых определялись в ходе маршрутных исследований, а координаты фиксировались по прибору GPS с точностью в пределах 10 м.

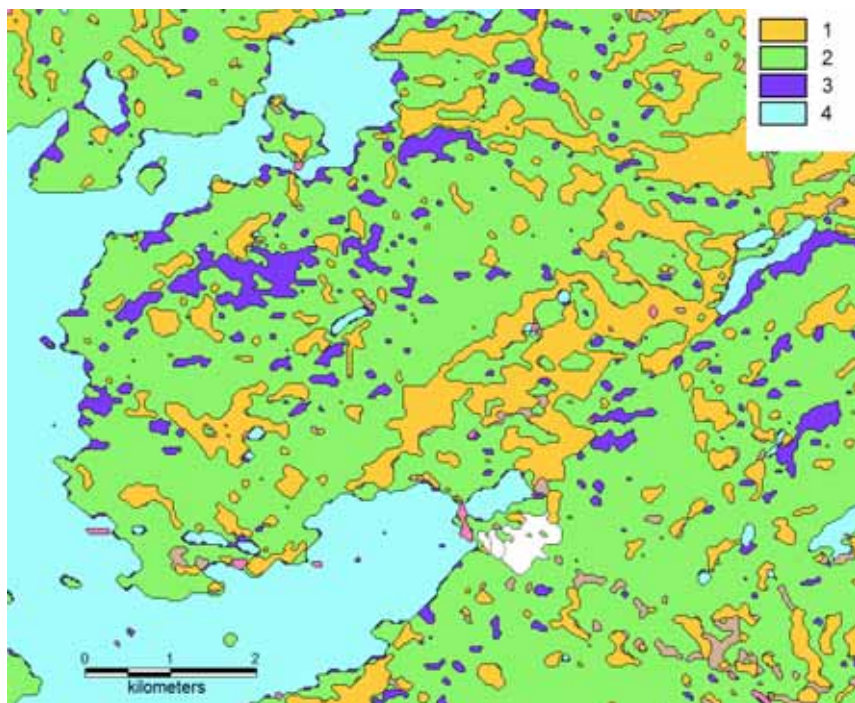


Рис. 59. Структура растительного покрова местностей первого и второго типа на рис. 58

1 — болото; 2 — сосняки; 3 — ельники; 4 — озеро

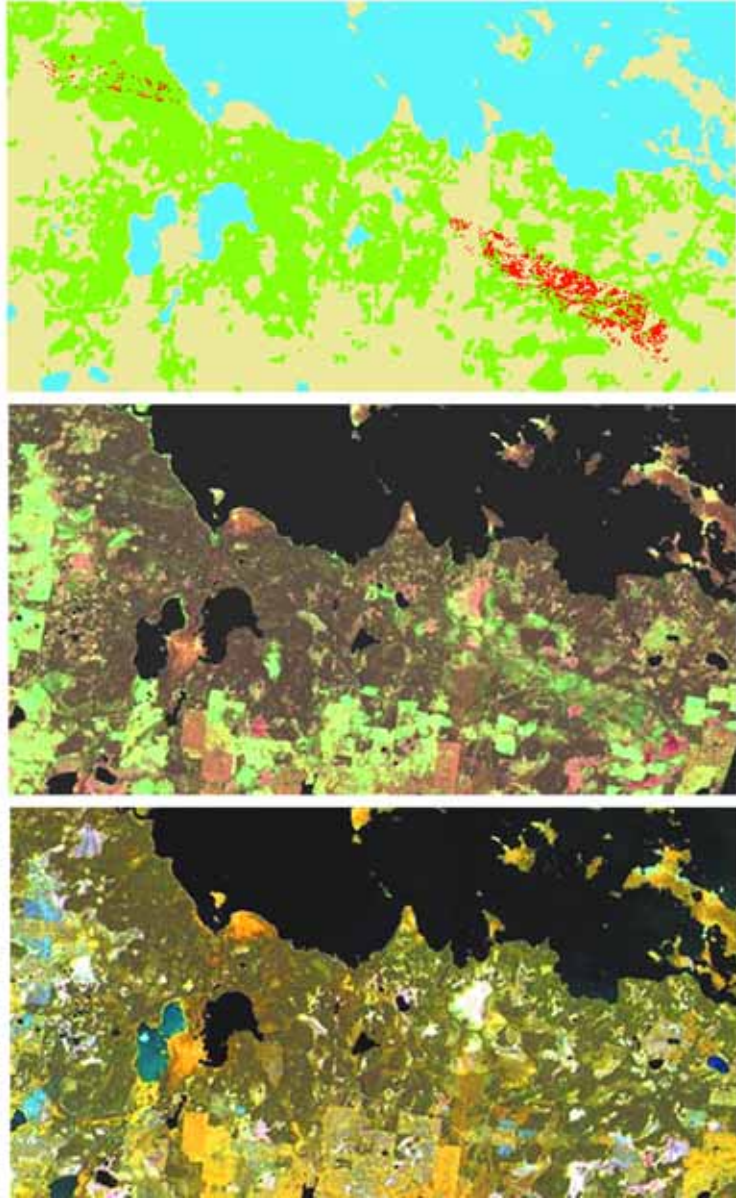


Рис. 60. Слева – RGB-синтез снимка Spot 1997 г., в центре – RGB-синтез снимка Landsat 2000 г., справа – полоса ветровала (красный цвет), полученная в результате классификации и логического сложения растров

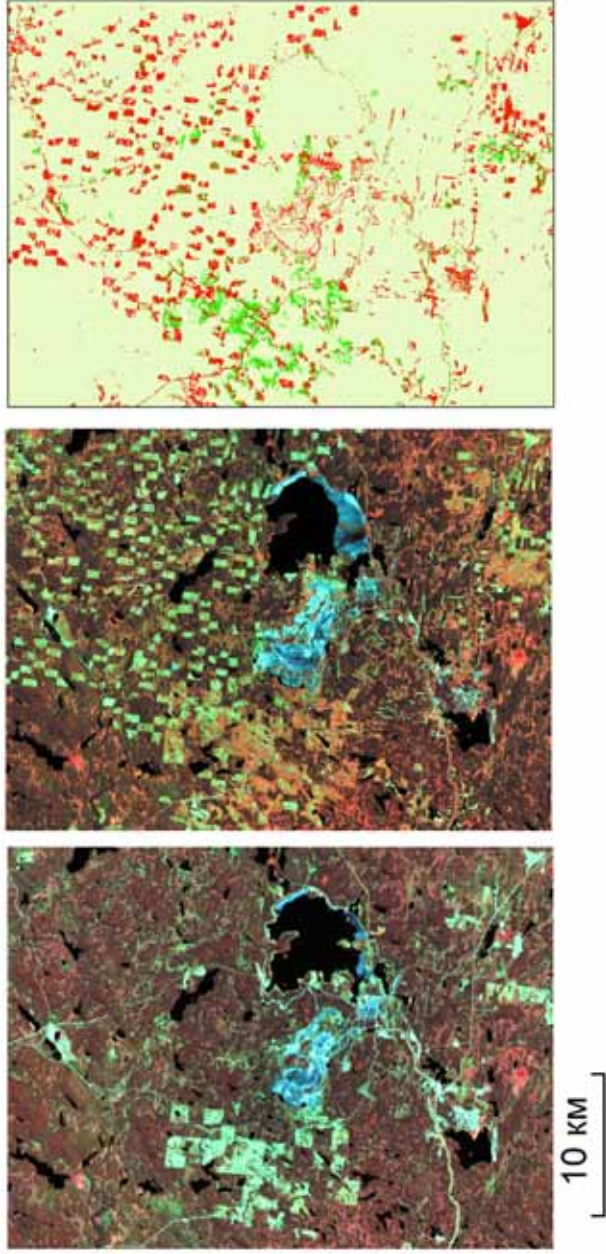


Рис. 61. Слева снимок 1986 г., в центре — снимок 2000 г., справа — классифицированный «разностный» снимок (красный — свежие вырубки, зеленый — естественное возобновление на старых вырубках)

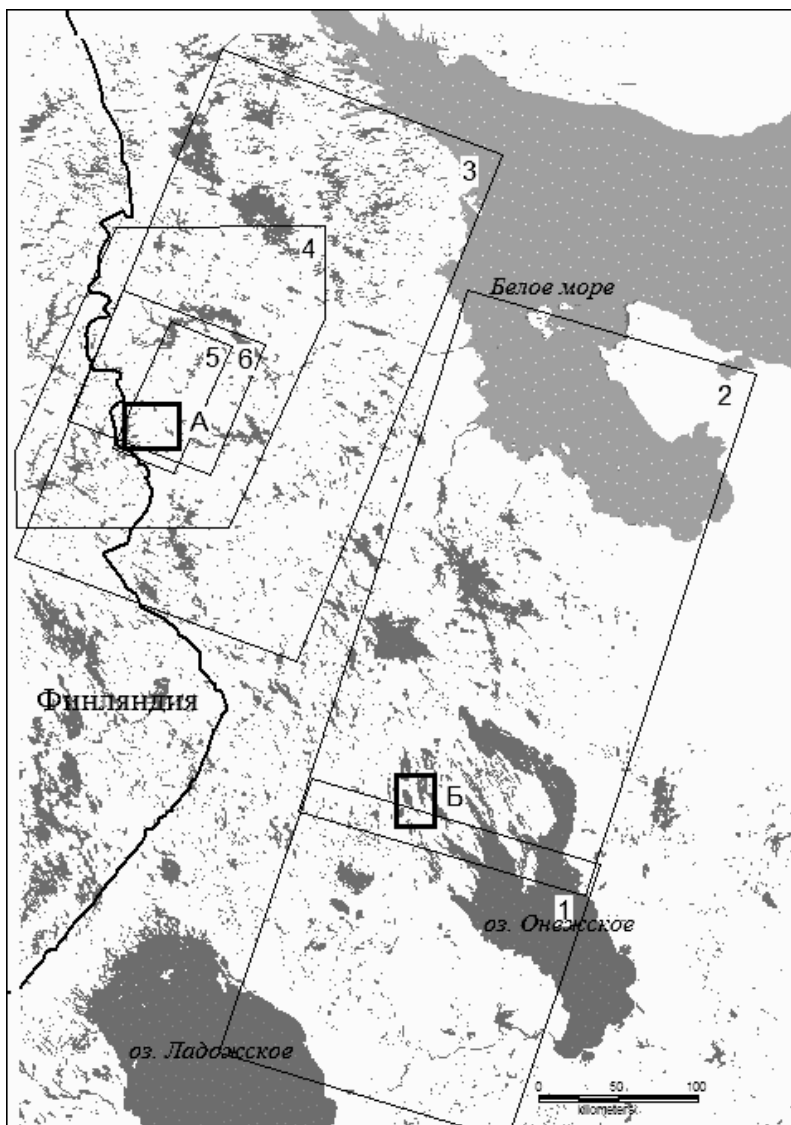


Рис. 62. Район исследований, сцены сканерных снимков и модельные территории А и Б

Модельный фрагмент А (рис. 63) расположен практически целиком в пределах одного типа ландшафта, широко распространенного как в северо-, так и в среднетаежной подзонах Восточной Фенноскандии денудационно-тектонического холмисто-грядового с комплексами ледниковых образований среднезаболоченного с преобладанием сосновых местообитаний, спектр лесных сообществ здесь включает почти все типы леса, встречающиеся в Карелии (Громцев, 2000). В пределах заповедника «Костомукшский» находится часть первого по величине в Фенноскандии и самого западного в Европе сравнительно хорошо сохранившегося массива первобытной сосновой тайги (Громцев, Литинский, 1999, 2002).

Восточная часть фрагмента находится, наоборот, в условиях сильного антропогенного стресса. Здесь расположен г. Костомукша, различные объекты инфраструктуры, дачные участки, свалки, ведутся интенсивные рубки (особенно в последние 10 лет), а рядом с северо-восточной границей фрагмента расположен Костомукшский горно-обогатительный комбинат (ГОК) – мощный источник аэротехногенных выбросов, прежде всего диоксида серы. Однако результаты как наземных (Лазарева и др., 1992), так и дистанционных исследований (Литинский, 1995, 1996) показывают, что Костомукшский заповедник находится практически за пределами импактной зоны выбросов, с 1992 г. ее расширения, по крайней мере по дистанционным данным, не наблюдается (Litinsky, 2002), поэтому его территория может служить «контролем» при оценке антропогенной нарушенности.

Территория ГОКа, его карьера и хвостохранилища намеренно не были включены в пределы модельного фрагмента, поскольку спектральные характеристики этих объектов резко отличаются от всех других естественных и антропогенных категорий земной поверхности лесной зоны, и их наличие затруднило бы сравнение спектрального пространства модельных фрагментов. Выделение же при классификации этих объектов именно ввиду уникальности их сигнатур трудностей не представляет.

Проекции спектрального гиперэллипсоида (рис. 64) были построены как для всего фрагмента, так и для визуально выбранной части Костомукшского заповедника (около 30% его площади), не имеющей дорог и других видимых следов антропогенных нарушений.

Как видим, спектральный гиперэллипсоид территории, находящейся в естественном состоянии, более компактен. Антропогенное воздействие приводит к появлению участков со спектральными характеристиками, которые не встречаются в ненарушенных территориях, и поэтому такие участки могут быть автоматически выделены путем классификации снимка.

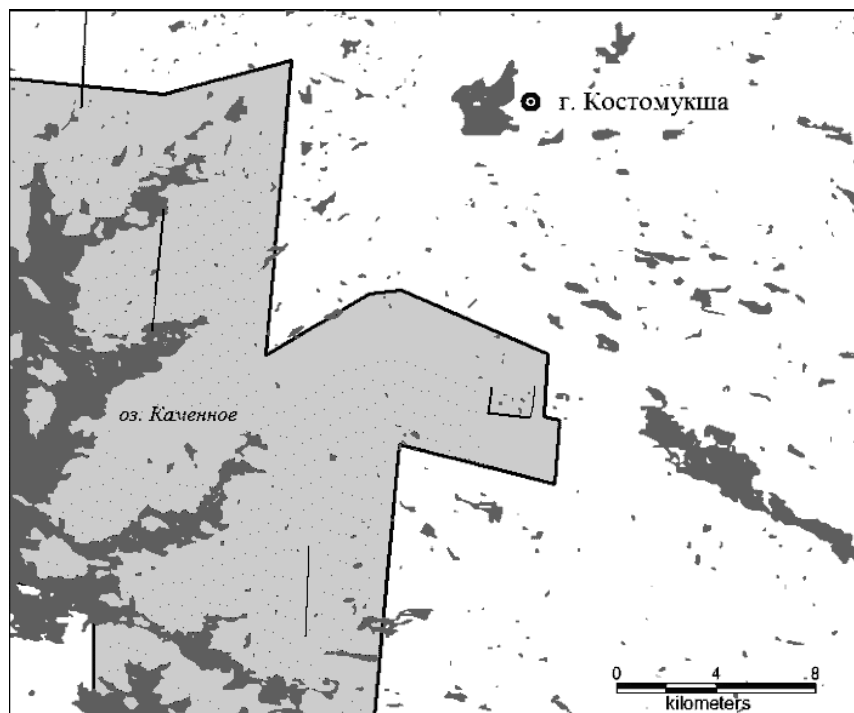


Рис. 63. Схема модельного фрагмента А

Серым показан заповедник «Костомукшский», линии – ландшафтные профили

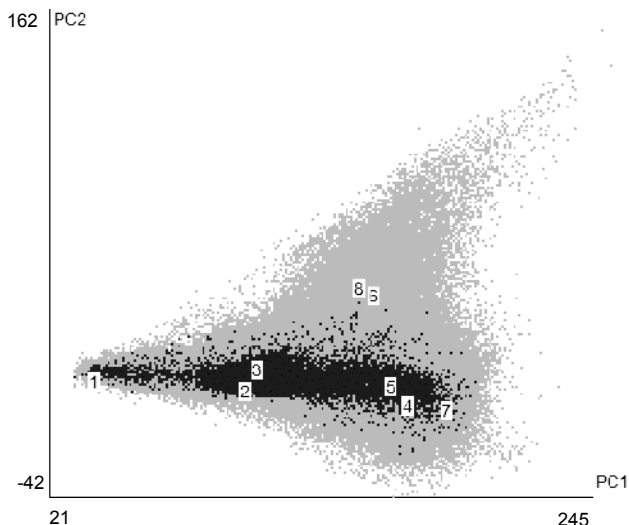


Рис. 64. Спектральный гиперэллипсоид северотаежной модельной территории в осях двух первых главных компонент (PC1 и PC2)

Серый цвет – территория в целом, черный – Костомукшский заповедник. Цифрами обозначены центры категорий:

1 – озеро; 2 – сосняк зеленомошный; 3 – сосняк скальный; 4 – открытое болото; 5 – старая вырубка; 6 – свежая вырубка; 7 – луг; 8 – минеральные земли

Модельный фрагмент Б (рис. 65) расположен большей частью в пределах одного типа ландшафта – денудационно-тектонического грядового (сельгового) среднезаболоченного с преобладанием сосновых местообитаний (Громцев, 2000), по фитоценоотическим характеристикам близкого к типу ландшафта северотаежного фрагмента. Аналогичным образом исследовалось спектральное пространство – проводился компонентный анализ всего фрагмента и построение гиперэллипсоида целиком для фрагмента и для большей части территории заповедника «Кивач», без дорог и застроек.

Гиперэллипсоид среднетаежной модельной территории (рис. 66) по конфигурации сходен с северотаежным, но более объемен. Это объясняется более благоприятными лесорастительными условиями, большей степенью антропогенной нарушенности территории и соответственно большим разнообразием категорий земной поверхности – наличием смешанных и лиственных лесов, различных сельхозугодий, промышленных объектов и т.д.

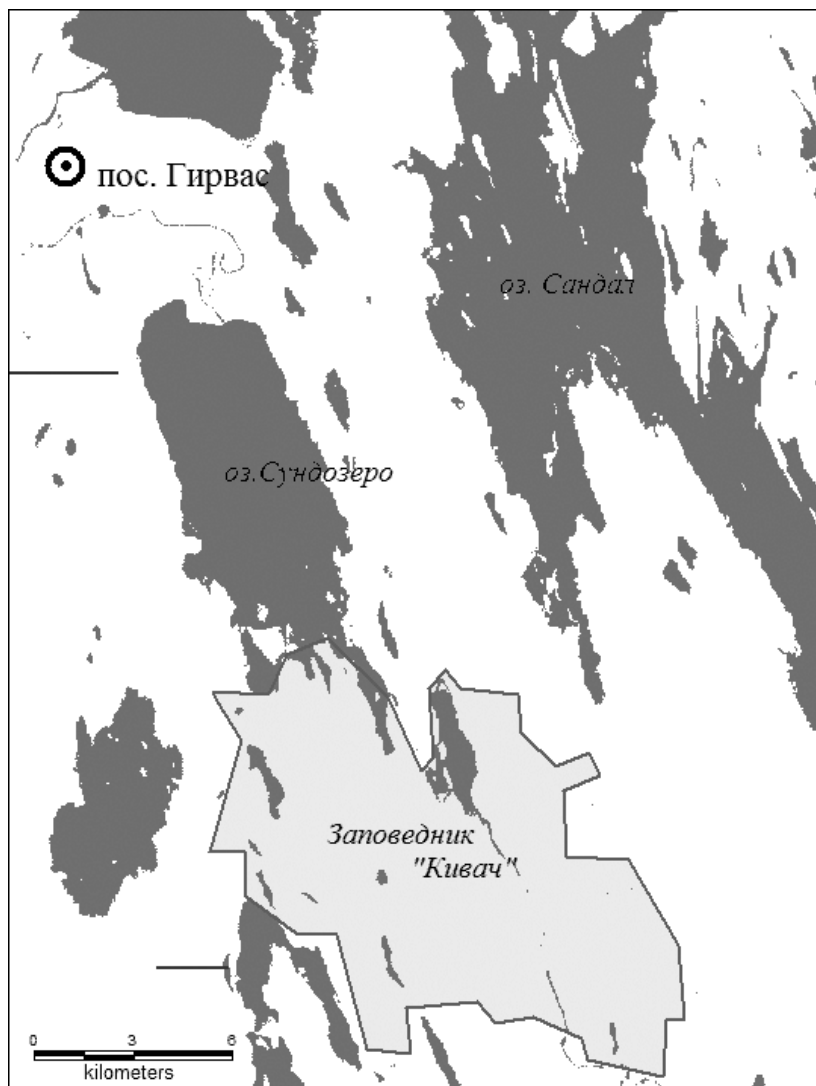


Рис. 65. Схема модельного фрагмента Б

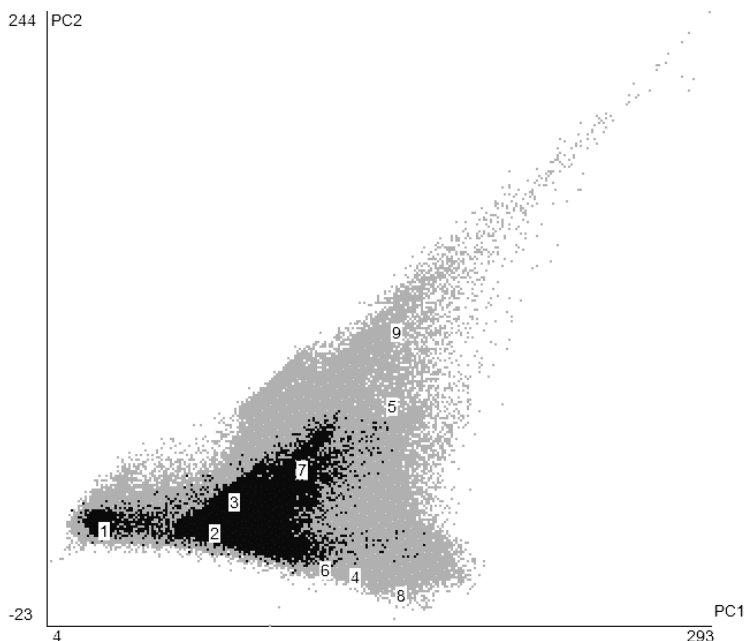


Рис. 66. Гиперэллипсоид среднетаежного модельного фрагмента

Серый цвет – весь фрагмент, черный – заповедник «Кивач».

Цифрами обозначены: 1 – озеро; 2 – сосняк зеленомошный; 3 – сосняк скальный; 4 – смешанные леса; кустарники; 5 – свежая вырубка; 6 – старая вырубка; 7 – открытое болото; 8 – луга, пашни; 9 – застройка, карьеры и т. д.

Верхняя правая часть гиперэллипсоида более вытянута. Здесь находятся сигнатуры категорий, полностью лишенных растительности. Сигнатуры вторичных категорий растительности – лиственных, смешанных лесов и кустарников, аграрных земель – располагаются в правой нижней части.

Однако форма гиперэллипсоида ненарушенной территории – заповедника «Кивач» – уже значительно отличается от северотаежной (Костомукшского заповедника), и причина этого, вероятнее всего, не только в лучших лесорастительных условиях. Территория заповедника «Кивач» может считаться ненарушенной лишь условно, поскольку интенсивное природопользование здесь велось на протяжении нескольких столетий. Природные комплексы были глубоко трансформированы антропогенными факторами (повсеместное аграрное освоение земель, в том числе

методом подсек, неоднократные сплошные и выборочные рубки, пожары и др.). Рубки были прекращены со времени создания заповедника, то есть лишь около 75 лет назад, поэтому и средний возраст лесов не более 120 лет. Раздвоение в правой части гиперэллипсоида заповедника «Кивач» как раз и свидетельствует о наличии на его территории значительной части вторичных производных лесов и еще более трансформированных категорий поверхности.

Большее разнообразие категорий поверхности повлекло и большее количество ошибок распознавания. Как и в северотаежной подзоне, при классификации возникали ошибки при распознавании зарастающих вырубок и открытых болот. Кроме того, часто в одну категорию попадали открытые болота и некоторые сельскохозяйственные земли, в первую очередь созданные на осушенных болотах. В данном случае использование параметров текстуры изображения было неэффективным, поскольку поверхности этих категорий одинаково ровные как в физическом, так и в спектральном отношении. По этой же причине здесь неэффективно и использование параметров рельефа, а также, вероятно, и радарных снимков, поскольку эти категории не должны сильно отличаться и по влажности. Наиболее эффективным было бы использование разновременных снимков, поскольку и здесь болота должны иметь более стабильные спектральные характеристики, чем сельскохозяйственные земли. К сожалению, для этой территории мы не располагали снимками достаточного спектрального и пространственного разрешения давностью более одного года.

Тем не менее для лесных экосистем данные однократной съемки Landsat 7 оказались достаточно эффективными. При классификации четко различались насаждения по крайней мере на трех стадиях сукцессии – лиственные молодняки, средневозрастные (с начала выхода хвойных в первый ярус) и припевающие и спелые (с преобладанием хвойных пород).

Рассмотренные методы оценки антропогенной трансформации по данным ДЗ были применены при разработке карты нарушенности ландшафтов по трассе планируемого газопровода Видяево–Волхов, проходящей по территории Карелии с севера на юг на протяжении 710 км. К моменту составления карты уровень понимания соответствия спектральных сигнатур определенным категориям земной поверхности позволил с достаточно высокой степенью достоверности выделить четыре категории антропогенной нарушенности: слабо-, средне-, сильно- и полностью трансформированных экосистем.

Снимки были классифицированы по данным категориям, полученные растры автоматически векторизованы. Результаты векторизации по всей трассе проверялись визуально по растровой подложке, значительных явных ошибок обнаружено не было, за исключением нескольких небольших участков «вырубок» среди болот в северотаежной подзоне. Однако эти ошибки были в типе ландшафта, значительно отличающемся от ландшафта модельного фрагмента, поэтому, вероятнее всего, при детальном изучении гиперэллипсоида данного типа ландшафта (сильнозаболоченной морской равнины) и этих ошибок можно было бы избежать. Фрагмент карты в наиболее антропогенно нарушенном участке трассы (окрестности пос. Гирвас) представлен на рис. 67.

Описание выделенных категорий нарушенности (составлено совместно с А.Н. Громцевым):

1. Малонарушенные территории – хвойные и хвойно-лиственные (с доминированием хвойных пород) леса и не затронутые мелиорацией открытые и облесенные болота. Данная категория представляет собой мозаику природных комплексов, находящихся в естественном состоянии или на поздних стадиях восстановления до состояния, близкого к естественному после различных видов антропогенного воздействия (почти исключительно рубок). Это разные по площади фрагменты коренных лесов, одновозрастные и разновозрастные производные хвойные и смешанные в самых различных вариациях сосно-елово-лиственные древесные группировки. При условии спонтанного развития из них постепенно формируется лесной покров, близкий к исходному. К этой же категории отнесены и неосушенные открытые и частично облесенные болота в естественном состоянии, то есть не затронутые мелиорацией.

2. Средненарушенные территории – леса с доминированием лиственных пород. Категория характеризуется производным растительным покровом, сформировавшимся на месте различных преимущественно сплошных рубок хвойных лесов. Древостои отличаются ярко выраженным доминированием лиственных пород – березы с небольшой долей осины. Обычно под их пологом постепенно формируется сначала подрост, а затем второй ярус ели. За пределами 100-летнего возраста древостоя ель начинает доминировать в первом ярусе и к 150–200 годам образуются моnodоминантные ельники. По своим фитоценотическим характеристикам они сходны с коренными одновозрастными ельниками.

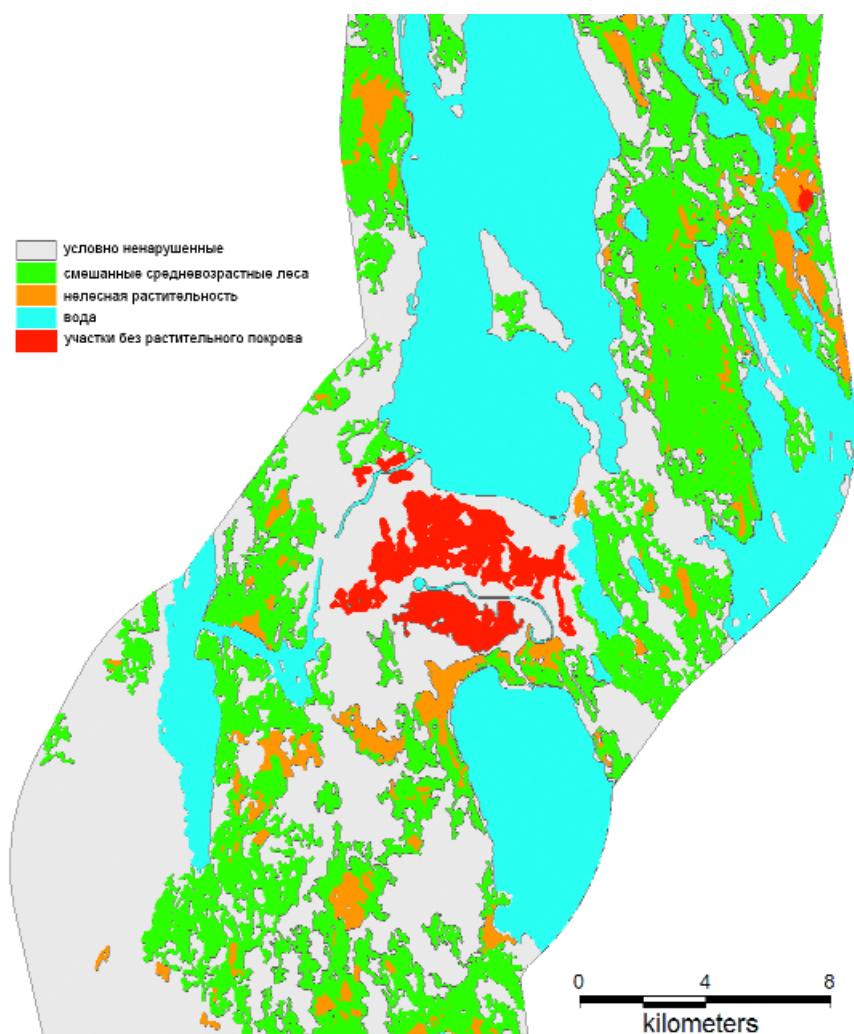


Рис. 67. Фрагмент карты антропогенной нарушенности коридора трассы газопровода Видяево – Волхов

Расшифровка легенды в тексте

3. Глубоконарушенные территории – луга, поля, пастбища и смешанные лиственные низкоствольные леса. Данная категория представляет собой мозаику абсолютно производных (антропогенных) растительных сообществ самого разного фитоценотического статуса – от луговых до низкоствольных лиственных (с ольхой, рябиной, черемухой, осиной, березой, ивой в самом разнообразном смешении). Смешанные низкоствольные леса возникли на месте подсек, лугов, пастбищ и других открытых пространств преимущественно аграрного назначения. Это абсолютно производный растительный покров. В процессе естественной динамики (при отсутствии антропогенного воздействия) он очень медленно трансформируется до состояния, близкого к следующей категории. Зброшенны аграрны землі покрываються лиственними лесами, розвиваючись в хвойно-лиственні. Под пологом низкоствольных лиственных лесов накапливается подрост ели. Он по мере роста проникает в верхний ярус, и ель сменяет недолговечные лиственные породы.

4. Полностью нарушенные территории – земли поселений, карьеры, погрузочные площадки, необлесившиеся вырубки, гари и т.п. В пределах данной категории природные комплексы замещены строениями, инженерно-техническими сооружениями самого различного типа, путями транспорта и транспортными узлами с инфраструктурой, а также вырубки 1–5-летней давности (без возобновления древесных пород). Их отличает практически полное отсутствие растительного покрова. Более того, именно эти объекты представляют собой источники бытового и техногенного загрязнения.

Исключением являются вырубки и гари, на которых начинается процесс естественного возобновления леса и через 10–15 лет формируется его новое поколение. Смыкание крон происходит в среднем через 15–20 лет после рубки. Таким образом, вырубки имеют временный статус «полностью нарушенных территорий».

Необходимо отметить, что при классификации по данной методике в категорию «малонарушенных» экосистем в северотаежной подзоне попадают и болота, пройденные осушительной мелиорацией, поскольку в этих природных условиях осушение не приводит к значительному изменению спектральных характеристик болота, регистрируемых используемым сканером. С другой стороны, это обстоятельство позволяет утверждать, что в данном случае осушение не приводит к значительному нарушению состояния экосистемы. Кроме того, работы по лесосушению прекращены 15–20 лет назад. В среднетаежной подзоне

в зависимости от даты проведения мелиорации и ее эффективности некоторые участки осушенных болот могли быть отнесены также к категории «средненарушенных».

Мониторинг состояния лесов в зоне воздействия аэротехногенных выбросов

Особенности спектра отражения лесного полога позволяют использовать информацию сканирования и для индикации начальных стадий деградации лесов под воздействием аэротехногенных выбросов, однако здесь необходимы несколько иные подходы, чем при классификации различных категорий растительного покрова.

В 1982 г. в северо-западной части Карелии начал функционировать Костомукшский горно-обогатительный комбинат (ГОК), ежегодно выбрасывающий в атмосферу более 60 тыс. тонн загрязняющих веществ в различных формах. Основной компонент выбросов – диоксид серы – сильный фитотоксикант. К умеренным фитотоксикантам относится железо, в больших количествах содержащееся в пылевых выбросах, к сильным – никель и хром, содержание которых в выбросах незначительно. Мониторинг состояния лесов в районе ГОКа проводился Институтом леса КНЦ РАН с 1986 г. Наземные исследования содержания техногенных выбросов в почве и напочвенном покрове позволили приблизительно оценить размеры очага повреждения, однако с их помощью затруднительно получить целостную картину состояния лесов в окрестностях источника выбросов, в связи с чем и была предпринята попытка использования данных сканирования, в качестве которых были взяты летние снимки 1986 и 1992 г., сделанные соответственно сканерами Landsat-TM и российским МСУ-Э, имеющим каналы в диапазонах G, R, NIR и пространственное разрешение 34x45 м.

Объектом исследований избраны спелые сосняки черничные – наиболее распространенный в этом районе тип леса: свыше 60% лесопокрытой площади. При закладке пробных площадей (ПП) был использован градиентный подход, направление градиентной линии соответствует направлению преобладающих ветров в районе исследований (ЮЗ–СВ).

Оценка состояния деревьев на ПП производилась по степени дефолиации кроны согласно методике, рекомендованной Международной программой мониторинга воздействия загрязнения воздуха на леса (Manual., 1986), при которой дерево в зависимости от степени потери хвои (до 10, 10–25, 26–60, свыше 60%, сухостой) относится к одному из пяти классов дефолиации (категорий состояния).

Для оценки состояния насаждения в целом применялся расчетный индекс DI, определяемый как средневзвешенный по площади сечения ствола на высоте 1.3 м класс дефолиации живых деревьев (класс 0–3). Сухостой (класс 4) не учитывался, поскольку воздействие ГОКа еще не могло вызвать отмирания деревьев. Для расчета использовались деревья только доминантного и содоминантного положения в пологе, дефолиация которых определяется прежде всего внешними воздействиями, а не фактором конкуренции.

До 1991 г. состояние насаждений на всех ПП, независимо от расстояния от источника выбросов, было примерно одинаковым, величина индекса DI – в пределах 0.2–0.4, что свидетельствует о преобладании в насаждении неповрежденных деревьев. В 1991 г. произошло резкое ухудшение состояния насаждений, и отчетливо проявилось воздействие комбината – на всех ПП, расположенных на расстоянии до 10–15 км от источника выбросов, индекс DI превышает единицу, а на остальных незначительно колеблется в пределах 0.6–0.8.

Увеличение степени дефолиации за период наблюдений зафиксировано на всех ПП, в том числе и на значительном расстоянии от комбината. Это может быть связано с природными периодическими колебаниями степени дефолиации, отмеченными при многолетних наблюдениях (Jukola-Sulonen et al., 1990). Однако деревья, перешедшие во второй класс дефолиации (25–60%), как правило, не возвращаются в первый класс, поэтому увеличение индекса дефолиации более 1.0–1.2 следует считать свидетельством несомненного повреждения насаждения.

Для дистанционной индикации состояния лесной растительности использовался простейший вегетационный индекс RVI (ratio vegetation index), представляющий собой отношение уровней сигнала по каналам «ближний инфракрасный» и «красный» (NIR/R), поскольку уменьшение количества зеленой биомассы вследствие дефолиации приводит к снижению коэффициента отражения в ближней инфракрасной области спектра, а падение концентрации хлорофилла увеличивает коэффициент отражения в красной области (Name, 1991).

При дешифрировании сканерного снимка необходимо среди различных категорий земной поверхности выделить объект исследований – спелые сосняки черничные и определить их состояние. Для выделения объекта исследования ключевыми участками служили постоянные ПП наземного мониторинга, а также ландшафтные профили, заложенные на территории Костомукшского заповедника. Как показала выборочная проверка результатов дешифрирования по натурным наблюдениям, при

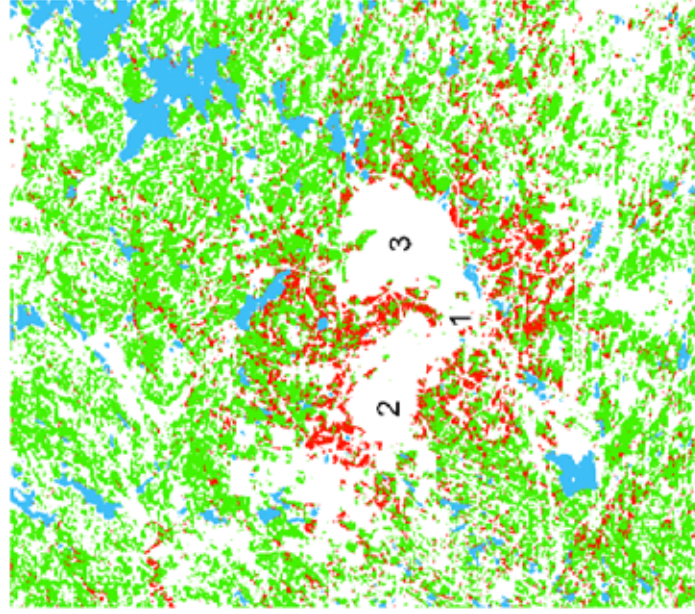
некотором огрублении для этой цели достаточно применить простейший метод интервалов (Nakane, Kimura, 1992), то есть задать соответствующие минимальные и максимальные величины по каналам G, R, NIR, снятые с постоянных ПП. При использовании этого метода к объекту исследований могут быть отнесены и близкие типы леса – несколько более сухие сосняки брусничные. Однако реакция деревьев на воздействие аэрополлютантов в столь близких типах леса не может значительно отличаться, поскольку при деградации лесных экосистем происходит определенное нивелирование роли эдафических факторов условий местообитания (Цветков и др., 1991). Учитывая также, что леса зеленомошной группы занимают подавляющую часть площади лесов изучаемой территории, можно считать такое упрощение допустимым. Большая часть лесных сообществ в районе исследований находится в климаксовой стадии развития, и поэтому при классификации практически не возникло дополнительных трудностей, связанных с выделением сообществ одного типа, но различного возраста.

В 1986 г. не было обнаружено корреляции между индексом дефолиации и спектральными параметрами (абсолютная величина коэффициента корреляции $r < 0.2$), однако на наиболее близких к комбинату ПП интенсивность канала NIR была ниже на 10–15%. Обработка снимка по соответствующему алгоритму показала, что такие насаждения сконцентрированы вокруг карьера и корпусов комбината в радиусе до 10 км (рис. 68, слева). Это позволяет утверждать, что снижение интенсивности канала NIR вызвано начавшимся в этот период уменьшением количества хвои 6–7-летнего возраста.

В 1992 г. проявилась сильная отрицательная корреляция ($r = -0.728$) между индексом DI и спектральным индексом NIR/R. Зависимость описывается уравнением регрессии:

$$\text{NIR/R} = -0.216 * \text{DI} + 1.819 \quad (1)$$

При повреждении, выходящем за границы естественных колебаний степени дефолиации, величина индекса DI превышает 1.1–1.2, поэтому можно принять исходя из уравнения (1), что неповрежденные насаждения характеризуются индексом NIR/R в пределах 1.80–1.62, а поврежденные – 1.61–1.44 (рис. 69). Дешифрирование снимка 1992 г. по данному алгоритму выявило четко различимое пятно овальной формы, образованное пикселями поврежденных насаждений, с центром в точке расположения корпусов комбината; площадь его значительно больше, чем в 1986 г. (рис. 69, справа).



10 км

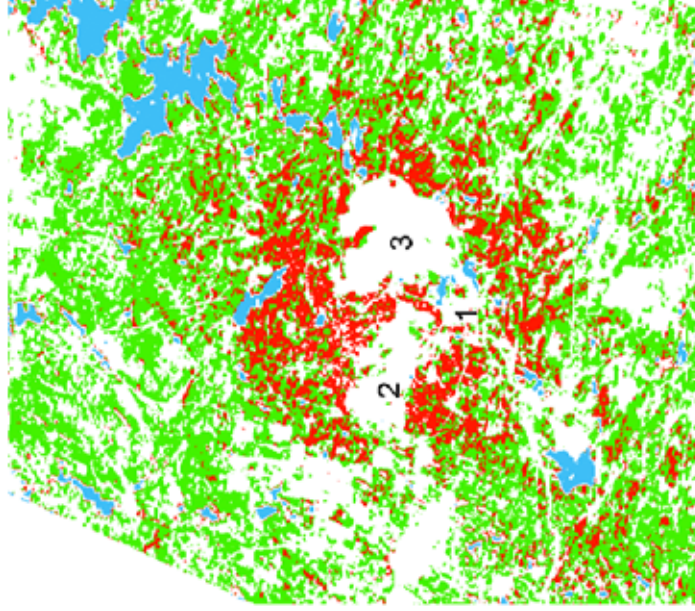


Рис. 68. Динамика изменения площади очага повреждения

На классифицированных снимках красным показаны участки с повышенной дефолиацией в 1986 г. (слева) и в 1992 г. (справа)

1 — комбинат; 2 — карьер; 3 — хвостохранилище

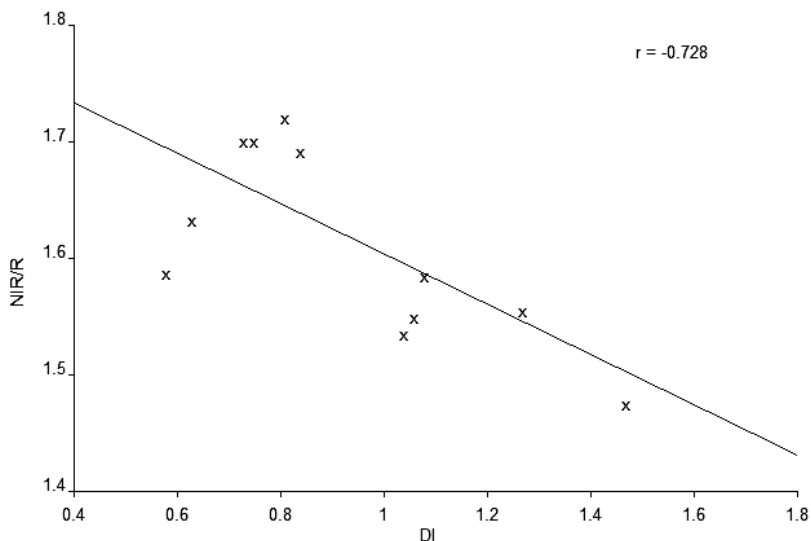


Рис. 69. Зависимость между вегетационным индексом NIR/R и индексом дефолиации DI

Для исследования закономерностей изменения степени повреждения лесов в зависимости от расстояния от источника выбросов были взяты части сканерных снимков к северу и северо-востоку от комбината, поскольку к югу от него территория подвергнута значительной антропогенной трансформации – здесь расположены железная и шоссейные дороги, различные мелкие предприятия и город Костомукша, поэтому картина повреждений может быть более сложной. Северо-восточное направление соответствует также направлению преобладающих ветров.

Эти участки снимков были обработаны следующим образом. В полосе шириной около 20 км для каждого пиксела, классифицированного методом интервалов как сосняк черничный, вычислялись значение спектрального индекса NIR/R и расстояние до комбината. Затем для уменьшения массива данных и сглаживания колебаний индекса рассчитывалось его среднее значение для расстояний от комбината, кратных 500 м.

Результаты приведены на рис. 70. Характер зависимости в 1986 и 1992 г. один и тот же: от минимального уровня вблизи источника выбросов индекс NIR/R линейно возрастает, затем, начиная с определенного расстояния, стабилизируется. В 1986 г. это расстояние составляло около 10 км,

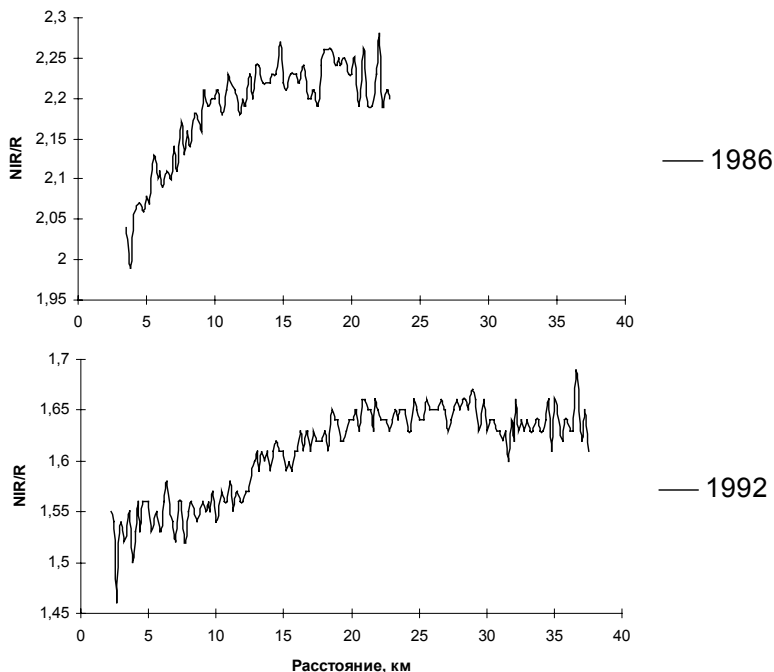


Рис. 70. Динамика изменения спектральных индексов сосняков черничных в зависимости от расстояния от источника выбросов

в 1992 – около 22 км. Величина индекса NIR/R на уровне стабилизации соответствует уровню, свойственному неповрежденным насаждениям и в 1992 г. практически совпадает с граничной величиной спектрального индекса, полученной по уравнению (1).

Следует подчеркнуть, что данные сканерной съемки позволили определить наличие поврежденной зоны вокруг источника выбросов за несколько лет до того, как они были выявлены наземными наблюдениями.

Визуальная оценка дефолиации крон после 1992 г. в окрестностях ГОКа не проводилась. Обработка снимка 2000 г. не показала значительных различий в величинах вегетационного индекса вблизи комбината и на значительном отдалении от него, что, по всей вероятности, также объясняется циклическими многолетними колебаниями степени дефолиации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные принципы и методы моделирования структуры и динамики таежных ландшафтов позволяют обрисовать основные черты ландшафтно-экологической географической информационной системы.

ГИС в данном случае понимается не только и не столько как набор каких-либо векторных и растровых слоев и программных средств для их анализа, а как программно-независимая система для **производства** формализованной географической, ландшафтно-экологической информации. Естественно, «программная» независимость относительна, имеется в виду, что под «системой» понимается прежде всего система исходных данных (база данных) и алгоритмов их обработки (база знаний), а программные средства и форматы файлов, используемых при обработке, не имеют принципиального значения. На современной стадии развития ГИС-технологий все это зависит только от предпочтений и финансовых возможностей исследователей.

Система включает в себя архив исходных данных и блок обработки (рис. 71).

В состав архива входят разновременные цифровые снимки сканеров высокого пространственного разрешения (Landsat TM/ETM+, Spot, IRS), цифровые модели высот и векторные данные ключевых участков: линии и полигоны ландшафтных профилей и точки маршрутных исследований с соответствующими атрибутивными характеристиками.

Традиционные статистические методы классификации сканерных снимков не могут обеспечить выявление границ ландшафтных структур, поэтому в системе применяется простой и достоверный метод управляемой классификации – сегментация спектрального пространства. Он заключается в сжатии многомерного спектрального пространства сканерного снимка в двухмерное методом главных компонент и в построении в этом пространстве по данным ключевых участков областей (сегментов), соответствующих категориям ключевых участков.

Отдельные категории земной поверхности (некоторые типы болот, вырубок, сельхозугодий) только по спектральным характеристикам на отдельно взятом снимке не различаются. В этом случае необходимо на разновременных снимках исследовать траектории таких категорий в спектральном пространстве, что в большинстве случаев даст возможность их достоверно идентифицировать. Таким образом, одновременно и исследуется *динамика* растительного покрова, и уточняется его *структура*. В некоторых случаях дополнительную информацию может дать изучение текстуры снимка.

Трехмерное моделирование структуры и динамики таежных ландшафтов



Рис. 71. Структурно-функциональная схема ландшафтно-экологической ГИС

В результате классификации сканерных снимков получается двухмерный растр структуры растительного покрова. Для получения ландшафтной структуры необходима его интеграция с данными о рельефе – различными геоморфометрическими параметрами, рассчитанными по цифровой модели высот, и с моделью рельефа как таковой. При этом на основе выявленных наземными исследованиями закономерностей приуроченности различных типов растительности к формам рельефа также детализируется и структура растительного покрова.

Данные ключевого участка экстраполируются на весь контур типа ландшафта, в котором участок расположен. Это позволяет формировать атрибутивные данные (например, показатели продуктивности лесов) на основе изучения ландшафтных закономерностей, а не путем поиска чисто статистических зависимостей между спектральными характеристиками крон и таксационными показателями ключевых участков.

Таким образом, основная «продукция» системы – карты структуры ландшафтов на всех иерархических уровнях и динамика их изменений в

результате естественных и антропогенных воздействий. Следует отметить, что в данном случае слои, служащие картой-основой традиционных ГИС (береговая линия озер, болота, вырубки и т.д.), здесь изначально **не нужны**, наоборот, они получаются автоматически, в качестве «побочного продукта». Так, в настоящее время береговая линия озер и крупных рек для большей части Карелии векторизована с детализацией масштаба 1:100 000 – 1:50 000, причем это не потребовало практически никаких дополнительных трудозатрат. Эти данные значительно точнее данных векторной карты масштаба 1:200 000, не говоря уже о точности карты миллионного масштаба.

Основное назначение системы – обеспечение дальнейшего развития ландшафтно-экологических исследований. В фундаментальном аспекте она послужит основой (структурной моделью) для разработки теории функционирования геосистем, в прикладном отношении область ее применения очень широка, что следует из очевидного факта – большинство характеристик природной среды в той или иной степени связаны с типом ландшафта. Представленные в ГИС данные уже широко востребованы в практике проведения государственных экологических экспертиз планов строительства промышленных предприятий, эколого-экономическом обосновании особо охраняемых природных объектов, сертификации крупных лесопромышленных предприятий и в целом при региональном планировании природопользования – ландшафтно-экологическом планировании (Gromtsev et al., 1999), формировании ландшафтно-картографической основы геосистемного мониторинга (Литинский, 2004).

В перспективе планируется использование в системе данных радарной и лазерной съемок (в том числе цифровых моделей высот), что наряду с расширением сети наземных ключевых участков позволит принципиально повысить уровень детализации моделирования ландшафтной структуры. Планируются исследования, направленные на оценку биоресурсного потенциала региона, и использование системы для государственного учета лесного фонда.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ГИС-пакет GRASS (Geographic Resources Analysis Support System)

Разработка пакета началась в 1982 г. в лаборатории Министерства обороны США, а с 1997-го к работе начинают подключаться независимые разработчики во всем мире. Пакет распространяется по лицензии GNU (бесплатно, с защитой авторских прав), то есть является «всеобщим достоянием», public domain. На сайте <http://grass.itc.it> можно получить пакет как в виде набора исполняемых файлов, так и в виде исходного кода на языке С для самостоятельной компиляции. GRASS используется во многих ведущих мировых учебных, научных, промышленных и государственных организациях (включая NASA, NOAA, USGS) для анализа геоданных, управления природопользованием и экологического планирования.

Пакет работает в операционной системе UNIX, но для пользователей Windows также имеется возможность использовать GRASS, необходимо лишь предварительно установить среду CygWin, эмулирующую ОС UNIX в ОС Windows. Причем в этом случае нет необходимости в изучении команд UNIX, нужны лишь некоторые базовые сведения. Установочные файлы CygWin также есть на вышеуказанном сайте с подробной инструкцией по установке. Сначала нужно установить CygWin, затем запустить ее и уже из этой среды установить GRASS. Аналогично при работе с GRASS: сначала нужно запустить CygWin и из нее запускать GRASS. Версии GRASS начиная с 6.3, как обещают разработчики, будут работать непосредственно в Windows.

Принципы работы с GRASS существенно отличаются от привычных для пользователей Windows. GRASS представляет собой пакет из нескольких сотен модулей (исполняемых файлов), каждый из которых выполняет определенные операции анализа географической информации в растровой и векторной формах, обработки данных дистанционного зондирования и географического моделирования. Большинство модулей выполняют следующие операции: загрузка исходного (входного) файла (файлов), обработка и запись результирующего (выходного) файла (файлов). Для каждого модуля имеется исчерпывающий файл справки в формате html со ссылками на литературные источники и именами и адресами разработчиков.

В отличие от пакетов Windows, которые сначала запускаются, а потом в них загружаются данные, для запуска GRASS необходимо сначала выбрать рабочий каталог с данными, иначе говоря, запуск и представляет собой выбор рабочего каталога.

Файлы данных GRASS хранятся в строго определенной структуре каталогов – **/database/location/mapset**.

При установке CygWin на диске C: создается одноименный каталог (*cygwin*), по структуре копирующий систему каталогов с зарезервированными именами UNIX (*bin*, *usr*, *etc*, *lib*, *home*). Файлы с данными пользователя помещаются в каталог *home*, в подкаталог с именем, соответствующим имени учетной записи, например, *user*, в котором и создается каталог с данными GRASS, например, *grass_data*.

Согласно терминологии GRASS, данный каталог – *c:/cygwin/home/user/grass_data* – называется *database*. В него входит один или несколько подкаталогов, называемых *location*, в каждом из которых в свою очередь создается один или несколько подкаталогов, именуемых *mapset*, в которых и содержатся собственно карты, растровые и/или векторные. При образовании *location* автоматически создается *mapset* под названием PERMANENT, в дальнейшем можно добавить другие с произвольными названиями. Все карты одного *location* должны быть в одной географической проекции.

Запуск GRASS осуществляется в несколько этапов. Сначала пакетным файлом Windows **cygwin.bat** запускается CygWin, появляется текстовый терминал UNIX, в котором командой **startxwin.sh** запускается графическая среда Xwin (текстовый терминал). Затем командой **grass6x** (x – номер версии) запускается модуль выбора (или создания) рабочего каталога, в котором нужно указать нужные *location* и *mapset*, затем появляется окно графического интерфейса **GIS Manager**, посредством которого можно запускать различные модули и визуализировать растровые и векторные карты. При этом модули можно также запускать путем набора их имени в текстовом окне XWin.

Каждая сессия GRASS выполняется в определенном *mapset* и *location*, для перехода в другой нужно из GRASS выйти и выполнить запуск снова.

Каждая карта GRASS, растровая и векторная, записывается в нескольких файлах с одинаковыми именами, хранящихся в отдельных каталогах:

Каталог	Содержание
cats	категории растровых данных (текст легенды)
cell	растровые данные в целочисленном формате
cell misc	различные данные о растровых данных (range, null)
cellhd	заголовки растровых файлов
colr	палитры (цветовые таблицы) растровых файлов
dbf	атрибутивные данные векторных файлов
fcell	растровые данные в формате с плавающей точкой
group	группы файлов мультиспектральных снимков
hist	истории файлов
vector	векторные данные

Каталоги **cell_misc** и **vector** содержат подкаталоги с именами, соответствующими именам карт. По причине такой сложной организации данных операции с картами (удаление, переименование, копирование) следует производить с помощью предназначенных для этого модулей – **g.rename**, **g.remove**. При необходимости использования в GRASS файлов Windows (например, при импорте/экспорте данных) переход на физические и логические диски осуществляется через каталог CygWin *cygdrive* (рис. 72).

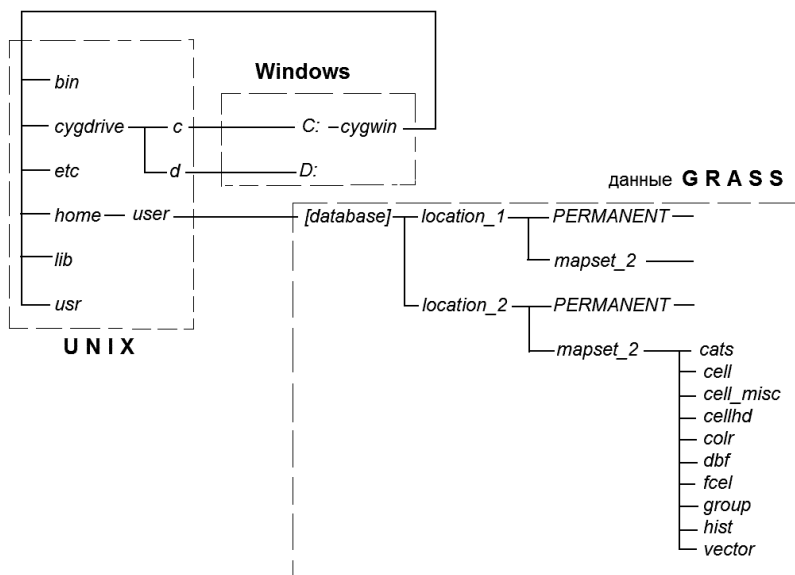


Рис. 72. Структура данных GRASS в файловой системе Windows/CygWin

При работе с GRASS ключевое понятие – регион (region) – тесно связано с понятием *location*. Region – это текущая географическая область, прямоугольная в проекции *location*, с определенным значением пространственного разрешения, в которой осуществляется обработка данных. Выполнение всех операций всеми модулями осуществляется только в пределах установленного региона и с установленным значением пространственного разрешения. При первом запуске системы необходимо создать *location*, то есть указать пределы географической

области (координаты северной, южной, восточной и западной границ), с которой будет работать система, а также параметры картографической проекции (тип проекции и эллипсоид), в которой эта работа будет осуществляться. Поскольку система ориентирована прежде всего на работу с растровыми данными, указывается также пространственное разрешение (размер пиксела). В период начала разработки системы некоторые сканеры имели неквадратный пиксел, поэтому система запрашивает разрешение отдельно по широте и долготе. В дальнейшем установки региона («габариты» и пространственное разрешение) можно изменить, но проекция остается неизменной.

Название модулей GRASS формируется из нескольких разделенных точками букв и сокращенных слов, соответствующих назначению модуля. Первая буква в названии обозначает:

- i (image)* – операции с данными дистанционного зондирования;
- r (raster)* – операции с картами в растровой форме;
- v (vector)* – операции с картами в векторной форме;
- g (general)* – общие операции: управление файлами, установка рабочих параметров системы и т.д.;
- d (display)* – операции визуализации в графических окнах (мониторах).

Следует иметь в виду, что в графический интерфейс **GIS Manager** включены не все модули системы и посредством его можно использовать не все параметры некоторых модулей. Кроме того, организация модулей по разделам меню интерфейса достаточно условна. Например, модуль анализа текстур *r.texture* включен в пункт меню «Анализ рельефа», тогда как эти операции могут использоваться и в других самых различных случаях.

Поэтому целесообразно использовать модули в текстовом режиме. Для этого нужно в текстовом терминале ввести название модуля, имена входного и выходного файлов, параметры и (при необходимости) ключи (flags). Параметры вводятся через знак « \Rightarrow » после названия параметра. В большинстве случаев для какой-либо обработки нужно применить последовательность операций, выполняемых различными модулями. Для этого можно создать пакетный файл, запускающий последовательность операций – обычный текстовый файл с любым названием, без расширения. Некоторые модули работают только в интерактивном режиме, когда после запуска модуля необходимо вводить запрашиваемые параметры.

Визуализация двумерных данных (растровых и векторных) реализована в GRASS далеко не самым удобным образом, поэтому при наличии пакетов настольной картографии типа MapInfo или ArcView удобнее импортировать данные в GRASS для обработки и затем экспортировать результаты. Примеры некоторых пакетных файлов для такого способа работы приведены ниже. В этом случае нет необходимости в графической среде XWin и запускать GRASS можно сразу в текстовом терминале CygWin непосредственно в нужном каталоге командой вида:

grass6x /home/user/grass_data/location_1/PERMANENT

ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ И ВЫПОЛНЯЮЩИЕ ИХ МОДУЛИ

Импорт

векторных файлов (MapInfo, ArcView) **v.in.ogr**
растровых файлов форматов TIF, BMP, GIF и т. д. **r.in.gdal**

Экспорт

растровых карт **r.out.gdal**
векторных карт **v.out.ogr**

Установки региона **g.region**

Геометрические трансформации

изменение проекции растровых/векторных карт **r.proj / v.proj**
изменение разрешения растров **r.resample**
ректификация растров **i.rectify**

Спектральные трансформации

преобразование моделей цвета **i.rgb.his, i.his.rgb**
анализ главных компонент **i.pca**

Классификация

создание группы каналов **i.group**
формирование сигнатур **i.gensig**
неуправляемая **i.cluster**
управляемая (метод максимального подобия) **i.maxlik**
установка палитры растра **r.color**

Анализ и моделирование

фильтрация растра	<i>r.neighbors</i>
анализ текстуры	<i>r.texture</i>
интерполяция DEM из векторных горизонталей	<i>v.surf.rst</i>
уклон/экспозиция склона	<i>r.slope.aspect</i>
геоморфометрический анализ	<i>r.param.scale</i>
моделирование водосборов	<i>r.watershed</i>
создание буферных зон	<i>r.buffer</i>
ландшафтное моделирование	<i>r.le.pixel, r.le.patch</i>
растровая математика/логика	<i>r.mapcalc</i>

Преобразования типов данных

растровых в векторные	<i>r.to.vect</i>
векторных в растровые	<i>v.to.rast</i>

Примеры пакетных файлов для выполнения некоторых операций

Последовательность операций включает в себя импорт данных в GRSS, обработку и экспорт. Векторные данные на входе/выходе записываются в формате MapInfo (.tab), растровые – GeoTiff или Tiff, в последнем случае для обеспечения географической привязки необходимо наличие соответствующего world-файла (.tfw). Входные/выходные данные помещаются в корневой каталог SygWin (/).

Создание цифровой модели высот из векторных горизонталей

```
v.in.ogr dsn=/h.tab output=h (импорт MapInfo файла)
g.region vect=h res=100 (установка границ и разрешения DEM)
v.surf.rst input=h zcolumn=H elev=d
r.out.gdal input=d format=GTiff type=Int16 output=/dem.tif
g.remove vect=h rast=d (удаление файлов GRASS)
```

Векторизация классифицированного растра

```
r.in.gdal /a.tif output=a (импорт [GEO]Tiff файла)
r.to.vect input=a output=a feature=area -v (векторизация с установкой атрибутов полигонов согласно категориям растра)
v.out.ogr input=a type=area dsn=/ olayer=a format=MapInfo_File
g.remove vect=a rast=a (удаление файлов GRASS)
```

Трехмерное моделирование структуры и динамики таежных ландшафтов

Отдельная часть системы – мощный модуль трехмерной визуализации NVIZ с достаточно удобным и понятным интерфейсом. Он запускается командой *nviz* и позволяет создавать трехмерные композиции, помещая растровые и векторные слои на цифровую модель высот, просматривать их с любыми значениями угла обзора и освещения, а также создавать анимации виртуального полета над поверхностью по заданному маршруту.

ЛИТЕРАТУРА

Аксенов Д. Е., Добрынин Д. В., Дубинин М. Ю. и др. Атлас малонарушенных лесных территорий России. М., 2003. 187 с.

Барталев С. А., Исаев А. С. Современные возможности спутникового мониторинга динамики лесных бореальных экосистем северной Евразии // Материалы международной конференции «Антропогенная трансформация таежных экосистем Европы: экологические, ресурсные и хозяйственные аспекты». Петрозаводск, 2004. С. 18–28.

Гагаева З. Ш., Пузаченко Ю. Г., Алещенко Г. М. Классификация форм рельефа горной территории для составления мелкомасштабной ландшафтной карты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2003. № 1. С. 26–35.

Горышина Т. К. Экология растений. М., 1979. 368 с.

Гофаров М. Ю. Применение ГИС-технологий для оценки геоэкологического состояния северотаежных ландшафтов Архангельской области (на примере Беломорско-Кулойского плато): Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2004. 22 с.

Громцев А. Н. Ландшафтная экология таежных лесов: теоретические и прикладные аспекты. Петрозаводск, 2000. 144 с.

Громцев А. Н., Литинский П. Ю. Выявление коренных лесов с помощью космических сканерных снимков // Материалы конференции «Коренные леса таежной зоны Европы». Петрозаводск, 1999. С. 88–89.

Громцев А. Н., Литинский П. Ю. Коренные леса Восточной Фенноскандии: природная организация, последствия антропогенной трансформации, концепция сохранения // Материалы конференции РФФИ. Петрозаводск, 2002. С. 23–24.

Данилин И. М., Медведев Е. М., Мельников С. Р. Лазерная локация Земли и леса. Красноярск, 2005, 182 с.

Ермаков Н. Б., Алсенбаев К. С., Попов Д. Ю. и др. Картографическое моделирование пространственной организации растительного покрова // Биоразнообразие и динамика экосистем: информационные технологии и моделирование. Новосибирск, 2006а. С. 276–289.

Ермаков Н. Б., Дитц Л. Ю., Равкин Ю. С. и др. Экспертно-аналитическая географическая информационная система (ГИС) «Пространственно-временная динамика экосистем Урала и Сибири // Биоразнообразие и динамика экосистем: информационные технологии и моделирование. Новосибирск, 2006б. С. 207–257.

Замятин А. В. Анализ динамики ландшафтного покрова на основе данных дистанционного зондирования Земли // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 50–64.

Замятин А. В. Классификация разновременных снимков в задачах прогнозирования изменений ландшафта земной поверхности // Земля из космоса – наиболее оптимальные решения. Материалы международной конференции, 26–28 ноября 2003 г. М., 2003. С. 116–117

Ивантер Э.В., Коросов А.В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск, 2003. 304 с.

Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И. Высотная аэрокосмическая съемка – закономерный этап развития дистанционного зондирования // Земля из космоса – наиболее оптимальные решения. Материалы международной конференции, 26–28 ноября 2003 г. М., 2003. С. 117–119.

Кравцова В. И. Международный симпозиум по дистанционному зондированию Земли Igarss-2002 (Канада) // Лесоведение. 2003. № 5. С. 24.

Лабутина И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. М., 2004. 184 с.

Лазарева И. П., Кучко А. А., Кравченко А. В. и др. Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние основных лесов Северной Карелии. Петрозаводск, 1992. 52 с.

Литинский П. Ю. Использование информации космического сканера МСУ–Э при изучении техногенной деградации лесов // Лесной журнал. 1995. № 1.

Литинский П. Ю. Оценка динамики деградации лесов в зоне воздействия выбросов Костомукшского ГОКа дистанционными методами // Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск, 1996. С. 182–192.

Литинский П. Ю. Ландшафтно-экологическая ГИС Восточной Финляндии // Труды Карельского научного центра РАН. Петрозаводск, 2003. Вып. 5. С. 100–107.

Литинский П. Ю. Концепция и методика создания ландшафтно-картографической основы геосистемного космического мониторинга // Материалы международной конференции «Антропогенная трансформация таежных экосистем Европы: экологические, ресурсные и хозяйственные аспекты». Петрозаводск, 2004. С. 334–337.

Мальшева Н. В., Орлова О. Л. Мониторинг лесных экосистем национальных парков с использованием дистанционных методов. Методические решения и опыт работ // Земля из космоса – наиболее оптимальные решения. Материалы международной конференции, 26–28 ноября 2003 г. М., 2003. С. 159–160.

Одум Ю. Основы экологии. М., 1975. 740 с.

Программа тематической интерпретации данных дистанционного зондирования ScanEx NeRIS. М., 2005. <http://www.scanex.ru/ru/software>.

Тутубалина О. В., Шипигина Е. А. Методика дешифрирования промышленного воздействия на северную растительность по многозональным космическим снимкам Landsat // Земля из космоса – наиболее оптимальные решения. Материалы международной конференции, 26–28 ноября 2003 г. М., 2003. С. 155–156.

Цветков В. Ф., Панкратова Р. П., Черкизов Е. А. Основы ведения лесного хозяйства в насаждениях, подверженных техногенному воздействию в условиях Мурманской области. Архангельск, 1991. 12 с.

Шаталов А. В., Жирин В. М., Сухих В. И. и др. Анализ информативности космических снимков высокого разрешения QuickBird // Международная конференция «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве». М., 2007. С. 168–174.

Ярошенко А. Ю., Потапов П. В. Применение космических многозональных снимков и ГИС-технологий при целевом ландшафтном картировании в рамках природоохранных проектов Гринпис России // ArcReview. 1999. № 4. С. 15.

Ball G. H. and Hall D. J. (1966), ISODATA, a novel method of data analysis and pattern classification. International Communications Conference, Philadelphia, June 1966. 22–29.

Bouman C., Shapiro M. (1992), «Multispectral Image Segmentation using a Multiscale Image Model», Proc. of IEEE Int'l Conf. on Acoust., Speech and Sig. Proc., pp. III-565 – III-568, San Francisco.

Bouman C., Shapiro M. (1994), «A Multiscale Random Field Model for Bayesian Image Segmentation», IEEE Trans. on Image Processing., 3(2). P. 162–177.

Colwell R. N., Brewer W., Landis G. et al. 1963. Basic matter and energy relationship involved in remote reconnaissance, Photogr. Engr., 29. P. 761–799.

Eastman J. R. (1985), Single-Pass Measurement of the Fractional Dimensionality of Digitized Cartographic Lines, Canadian Cartographic Association, Annual Meeting, June 1985. P. 117–125.

Forman R. T. T. (1995). Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions. Cambridge University Press, Cambridge. 632 p.

Forman R. T. T., Godron M. Landscape Ecology. N.-Y.: John Wiley Sons, 1986, 619 p.

Hame T. Spectral interpretation of changes in forest using satellite scanner images // Acta Forestalia Fennica 222. 1991. 111 p.

Haralic R. M. (1977), Statistical and Structural Approach in Texture Proc of IEEE, Vol. 67, No. 5. P. 786-804, Seattle, Washington.

Gromtsev A. N., Antipin V. K., Volkov A. D. et al. Comprehensive characteristics of the pilot territory its ecological, resource and economic evaluation and recommendations on ecological landscape planning on example of the model fragments // The application of ecological landscape planning in forest resources management in Karelia / Tacis project: Forest resource Management in North-West Russia: the Karelian Project FDRUS9507. Petrozavodsk, 1999. 29 p.

Irons J. and Petersen G. (1981), Texture Transforms of Remote Sensing Data, Remote Sensing of Environment. Vol. 11. P. 359–370.

Jukola-Sulonen E-L., Mikkola K., Salemaa M. (1990), The Vitality of Conifers in Finland // Acidification in Finland. Berlin. P. 523–560.

Kohonen T. Self-Organizing Maps. Second Edition. Springer-Verlag, Heidelberg, 1997. 241 p.

Litinsky P. (2002), Space-time dynamics of pristine boreal forests decline near point source of SO₂ emission // Proc of Boreal Forest Disturbance Dynamics Conf. Canada.

Manual on methodologies and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Convention on long-range transboundary air pollution on forests. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forest. 1986.

Moore R. K., Simonett D. S. (1967), Radar remote sensing in biology. BioScience, 17. P. 384–390.

Monmonier M. S. (1974), Measures of Pattern Complexity for Choropleth Maps, The American Cartographer, 1, 2. P. 159–169.

Трехмерное моделирование структуры и динамики таежных ландшафтов

Murphy D. L. (1985). Estimating Neighborhood Variability with a Binary Comparison Matrix, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51, 6. P. 667–674.

Nakane K., Kimura Y. Assessment of pine forest damage by blight based on Landsat TM data and correlation with environmental factors. *Hiroshima Univ. Ecological Research* 1992. Vol. 7, N 1. P. 9–18.

Richards J. A., Xiuping Jia. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Berlin, 1999. 400.

Risser P.G., Karr J. R. and R. T. T. Forman. 1984. *Landscape ecology: directions and approaches*. Illinois Natural History Survey Special Publication No. 2, Champaign, Illinois. 18 p.

Rock B., Williams D. and Vogelmann J. Field and airborne spectral characterization of suspected acid deposition damage in red spruce (*Picea rubens*) from Vermont. *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, Indiana, 1985. P. 71–81.

Sabins, Floyd F., Jr. *Remote Sensing Principles and Interpretation*. New York: W. H. Freeman & Co, 1987. P. 449.

Sammon Jr., J. W. (1969) «A nonlinear mapping for data structure analysis», in: *IEEE Transactions on Computers*, C-18(5). P. 401–409.

Taylor P. J. (1977). *Quantitative Methods in Geography. An Introduction to Spatial Analysis*. Boston, MA, Houghton Mifflin Company.

Tomppo E. (1990). Satellite image-based national forest inventory of Finland. *The photogrammetric journal of Finland*, Vol. 12, N 1, 1990. P. 115–120.

Turner, M. G. (1989). *Landscape Ecology: The Effect of Pattern on Process*, *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 20, 171–197.

Tucker, C. J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combination for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 8. P. 127–150

Urban, D.L., R.V. O'Neill, and H.H. Shugart, Jr. (1987). Landscape ecology: a hierarchical perspective can help scientists understand spatial patterns. *Bio Science* 37. P. 119–127.

Wood, J. (1996). *The Geomorphological characterisation of Digital Elevation Models*. Diss., Department of Geography, University of Leicester, U. K. <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd/>

П. Ю. Литинский

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
И ДИНАМИКИ ТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТОВ

*Печатается по решению Ученого совета
Института леса Карельского научного центра РАН*

Редактор *Козлова Г. В.*
Верстка – *Тимонен Г. А.*

Изд. лиц. № 00041 от 30.08.99 г. Сдано в печать 20.01.08.
Формат 60×84¹/₁₆. Гарнитура Times.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 7,0. Усл. печ. л. 6,6.
Тираж 200 экз. Изд. № 65. Заказ № 709 .

Карельский научный центр РАН
Редакционно-издательский отдел
Петрозаводск, пр. А. Невского, 50